

KUANTUM YAPILI KIZILÖTESİ ALGILAYICILAR

Bülent ASLAN

*Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü
Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı, Yunusemre Kampüsü 26470 Eskişehir
bulentaslan@anadolu.edu.tr*

ÖZET

Kızılötesi ışınının keşfinden beri araştırılmakta/çalışılmakta olan kızılötesi algılayıcılar bugün çok farklı uygulama alanlarına sahiptir. Elektromanyetik tayfın bu bölgesinde çalışan algılayıcı sistemlerin geliştirilmesi ve en iyileştirilmesi, uygulama alanlarındaki genişlik ve hassasiyet nedeniyle hızla çalışılmaya devam etmektedir.

Bu çalışmada, kızılötesi kavramından kısaca bahsedildikten sonra bu bölgede algılama yapan yapılar ve algılamanın fiziği temel seviyede açıklanmaya çalışılmıştır. Bir kızılötesi algılayıcı sistemi oluşturan birimlerin tanımlaması yapıldıktan sonra Türkiye'nin bu konudaki yerini ve tecrübesini gösteren çalışmalar/basamaklar kısaca açıklanmıştır. Ülkemizde Astronomi uygulamalarında kullanılmak üzere kızılötesi dedektör geliştirilmesi konusunda henüz bir girişimin olmadığı ancak bu konuda bir projenin başlatılabilmesi için yeterli altyapının olduğu vurgulanmıştır.

GİRİŞ: KIZILÖTESİ KAVRAMI

İnsan gözü, 0,69 µm'de gelen ışının sadece %1'ini algılar; bu oran 0,75 µm'de ise %0,01'e düşer. Bu değerler, gelen ışık şiddetinin çok fazla olmadığı durumlarda görmenin mümkün olmadığını söylemektedir. İnsan gözü için “karanlık” bölge olarak niteleyebileceğimiz bu bölgede “görmek”, kızılötesi ışımanın keşfinden bu yana merak uyandırmıştır. Kızılötesi dalgaboylarının algılanmasını istemekteki sebeplerimizden bir kaçını bugünkü bilgi birikimimizle şöyle sıralayabiliriz;

- Karanlıkta görebilmek
- Ortamdaki “sıcak” noktaları algılayabilmek (insan, ateş-yangın, makine vs)
- Toz ve dumanda görüntü alabilmek
- Malzeme tanımlaması yapabilmek.

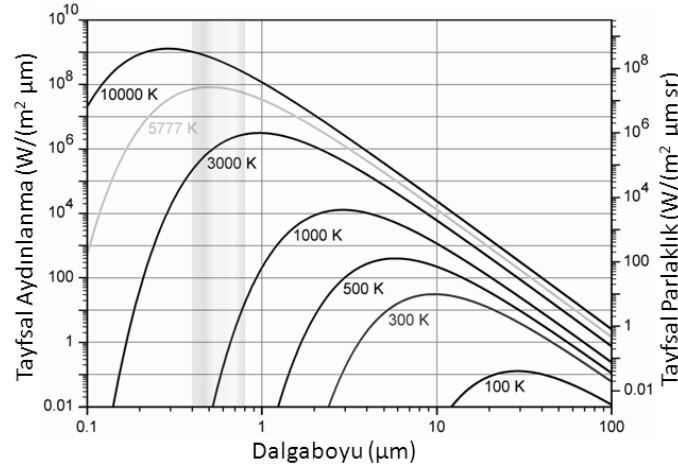
Karacisim Işınması ve Atmosfer Geçirgenliği

Görünür bölge dalgaboyuna kıyasla daha büyük dalgaboyuna sahip elektromanyetik tayfın bu bölgesinin bizim için önemli olmasının iki temel nedeni vardır: karacisim ışıması ve moleküler titreşimler. Bilindiği gibi, 0 K (mutlak sıfır) sıcaklığından farklı sıcaklığa sahip her nesne ışıma yapar. *Karacisim ışıması* olarak bilinen bu ışımanın şiddeti ve dalgaboyu cismin sıcaklığına bağlıdır ve birim katı açısı başına düşen parlaklık değeri şu şekilde ifade edilir:

$$L_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)} d\lambda \left[\frac{W}{cm^2 \cdot sr} \right] \quad (1)$$

27 Ağustos – 1 Eylül 2012 Malatya

Burada, k : Boltzmann sabiti, h : Planck sabiti, c : ışık hızı, T : sıcaklık ve λ : dalgaboyudur. Şekil 1’de, bu eşitlikten elde edilen tayfsal parlaklık eğrileri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, ışıma tayflarının bilinmesi, cisimler hakkında bilgi almak bakımından veya cisimlerin doğasını anlamak bakımından önemlidir (Şekil 2).



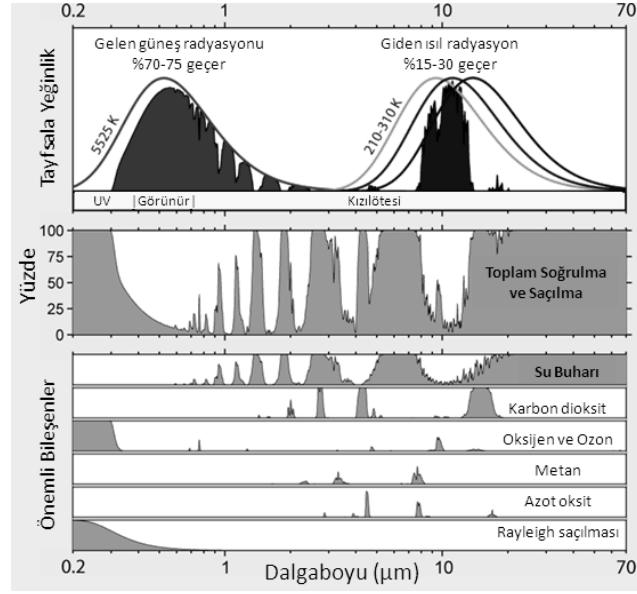
Şekil 1. Karacisim ışıması. Oda sıcaklığındaki cisimler (300 K) en çok $\sim 9 \mu\text{m}$ dalgaboyu civarında ışıma yaparlar (kırmızı renkli eğri).



Şekil 2. Görünür ve kızılötesi bölgelerde alınmış görüntülerin karşılaştırılması. Görünür bölgede geçirgen olmayan siyah renkli torba, $7,5\text{--}13 \mu\text{m}$ dalgaboyu aralığına duyarlı ısı (termal) kamera ile bakıldığında şeffaf görünmektedir. Benzer şekilde gözlük camları ise kızılötesi bölgede geçirgen değildir. Sağ kolon, soğukkanlı bir kertenkelenin vücut sıcaklığının sıcakkanlı insanla farkını göstermektedir. Görüntülerin ve farklılıkların sebebi yine karacisim ışımasıdır. [1,2]

Kızılötesi bölge, aynı zamanda cisimlerin yapısal karakterleri hakkında bilgi edinmek amaçlı da kullanılmaktadır. Moleküllerin dönme ve titreşim hareketleri, kızılötesi bölgede soğurma yapmalarına sebep olur. Bağların titreşim frekansı ile üzerine gelen ışımanın frekansı aynı olduğunda, gelen ışıma yapı tarafından soğurulur. Soğrulan bu frekans değerleri, atomun kütlesine, moleküllerin şekline ve uzunluklarına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, barındırdığı gaz moleküllerinin, yağmurun ve karın etkisiyle atmosfer, doğrudan soğrulma ve saçılma yoluyla kızılötesi ışıınımı soğurur (Şekil 3). Bu, ısı ışıınının atmosfer boyunca bazı dalgaboylarında zayıflayarak geçmesi anlamına gelmektedir. Böylece, kızılötesi ışıınının geçebileceği atmosfer pencereleri oluşur.

27 Ağustos – 1 Eylül 2012 Malatya



Şekil 3. Atmosfer geçirgenliği. Güneşin yüksek sıcaklığı nedeniyle küçük dalgalı boylarında ($< 2 \mu\text{m}$) atmosfere gelen ışımanın (kırmızı bölge) %70-75'i geçerek yere ulaşır. Yeryüzündeki ortalama sıcaklık nedeniyle $\sim 10 \mu\text{m}$ bölgesindeki ışımanın (mavi bölge) %15-30'u atmosferden geçerek tekrar uzaya yayılır. Işımların geri kalan kısımları, atmosferdeki moleküller tarafından soğrulur.

Kızılötesi Bölge Tanımlamaları

Görünür bölge sınırı kabul edilen $0,7 \mu\text{m}$ 'den büyük dalgalı boylarını kapsayan kızılötesi bölge, alt gruplara ayrılarak isimlendirilmiştir. Sınırların çok keskin olarak çizilemediği bu bölge tanımlamaları, farklı çalışma grupları tarafından farklı yapılmıştır: Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE), ISO 20473, Haberleşme (optik iletişim) tanımlamaları mevcuttur. Bu çalışmayı ilgilendiren iki temel alan, Astronomi ve Algılayıcı Tepkisi tanımlamaları ve ait oldukları dalgalı boylu aralıkları Tablo 1'de örnek olarak verilmiştir.

Tablo 1. Kızılötesi bölge tanımlamaları.

	İsim - Tanımlama	Gösterim	Dalgalı boylu aralığı (μm)
Astronomi Tanımlaması	Yakın kızılötesi	NIR	$(0,7-1) - 5$
	Orta kızılötesi	MIR	$5 - (25-40)$
	Uzak kızılötesi	FIR	$(25-40) - (250-350)$
Algılayıcı Tepkisi Tanımlaması	Yakın kızılötesi	NIR	$0,7 - 1$
	Kısa-dalga kızılötesi	SWIR	$1 - 3$
	Orta-dalga kızılötesi	MWIR	$3 - 5$
	Uzun-dalga kızılötesi	LWIR	$8 - 12$ veya $7 - 14$
	Çok uzun-dalga kızılötesi	VLWIR	$12 - 30$

Kullanım Alanları

Kızılötesi algılayıcıların kullanıldığı askeri ve sivil birçok uygulama mevcuttur. Bu uygulamalara, yazılanlarla sınırlı olmamak koşuluyla, örnek olarak şunları verebiliriz:

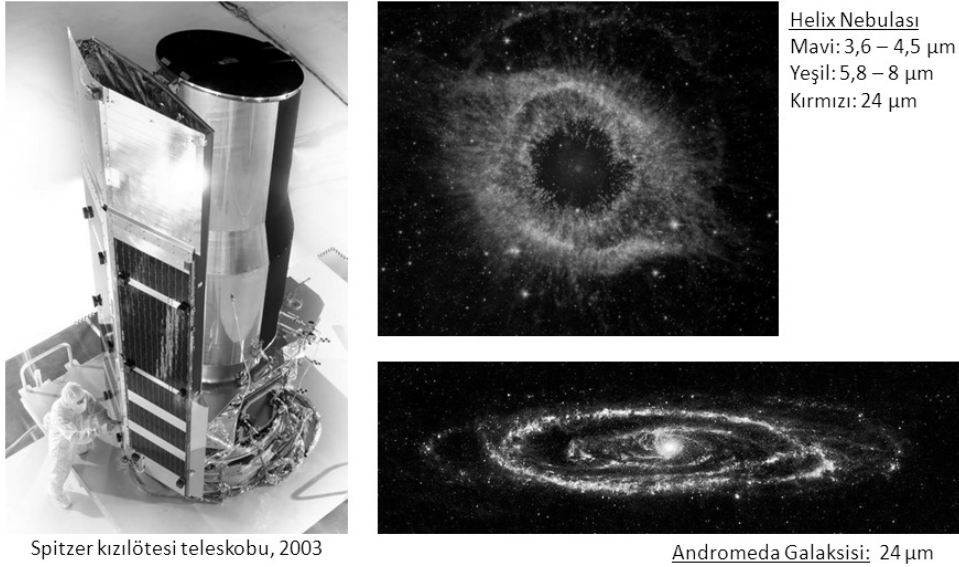
Sivil

Isı verimi analizleri	Çevre kontrolü / takibi	Astronomi
Endüstriyel tesis denetimi	Uzaktan sıcaklık algılama	Arkeoloji
Kısa mesafe kablosuz iletişim	Spektroskopi / malzeme analizi	Tıp / Sağlık
Hava tahmini	Arama / Kurtarma	...

Askeri

Hedef belirleme	Gözetleme / güvenlik
Gece görüş	Güdümlü kontrolü

Önemli uygulama alanlarından biri olan Astronomi’de, kızılötesi algılayıcılar, uzayın “tozlu” bölgelerinin arkasında kalan bölgelerinin, yıldız evrelerinin, galaksilerin büyümelerinin, evrenin ilk günlerinin araştırılması gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Kızılötesi algılayıcıların bulunduğu teleskopların 1980’lerin başında dünya çevresindeki yörüngelere gönderilmeye başlanmasıyla çok sayıda yeni keşif yapılmıştır. Örneğin, Amerika, İngiltere ve Hollanda ortak projesi olan Kızılötesi Astronomik Uydusu (IRAS), 12, 25, 60 ve 100 μm dalgaboylarında algılama yapabilme yeteneğiyle, kataloglanmış astronomik kaynakların sayısını %70 mertebesinde arttırmıştır [3]. Benzer şekilde, 2003 yılında yörüngeye yerleştirilen Spitzer kızılötesi teleskobu, gelişmiş teknolojisi ve çok sayıda algılayıcısıyla çözünürlüğü çok daha yüksek görüntüler olarak bilgi üretmeye devam etmektedir (Şekil 4) [4].



Şekil 4. Spitzer kızılötesi uzay teleskobu ve farklı dalgaboylarında aldığı görüntüler. [4]

Sanat tarihi uygulamalarındaki, resimlerin incelenmesi, yenilenmesi (restorasyon) ve korunması, sahte eserlerin tespiti gibi gereksinimler, 1960’larda geliştirilen Kızılötesi Yansıma Grafisi tekniği kullanılarak giderilebilmektedir [5]. Örneğin, Pablo Picasso’nun *Yaşlı Gitaracı* eseri bu yöntemle incelendiğinde, resmin altında başka figür olduğu görülmüştür. Mısır’da kızılötesi kamera ile alınan uydu görüntüleri kullanılarak çok sayıda piramit, lahit ve kazı alanı bölgeleri tespit edilmiştir [6]. Kore’de Ulusal Kültürel Miras

Araştırma Enstitüsü'nde, geleneksel mimari eserlerin incelenmesi ve korunmasında kızılötesi görüntüleri kullanılmaktadır [7]. Bu ilginç örnekler daha çok artırılabilir. Kızılötesi algılayıcılar, bahsedilenlere ek olarak, arama kurtarma çalışmalarında, binalardaki ısı ve su kaçaklarının tespitinde, enerji tasarrufu uygulamalarında, demiryolu kontrolü ve orman yangınlarında, meteorolojide, adli vakalarda ve suçbilim uygulamalarında, otomotiv sektöründe sürücü gece görüşü sağlanmasında ve benzeri çok sayıda uygulamada/alanda kullanılmaktadır.

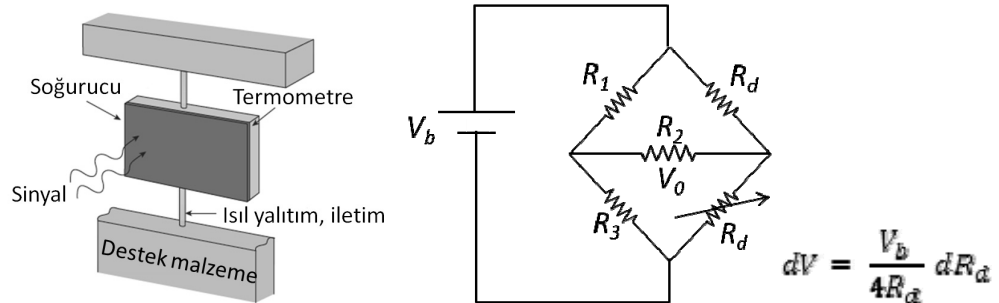
KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER VE ALGILAMANIN FİZİĞİ

Dedektörler, *foton* ve *ısı* dedektörler olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilirler. Gruplarda yer alan dedektörlerin temel algılama mekanizmaları ve diğer özellikleri şöyle özetlenebilir:

	<i>Foton Dedektörler</i>	<i>Isıl Dedektörler</i>
<i>Mekanizma</i>	Algılanacak foton, malzeme içindeki kristal örgü ile etkileşir: elektron uyarılır ve foto-elektron oluşur.	Algılanacak foton, yapı tarafından soğurulur ve malzemede sıcaklık değişimi olur: ölçülebilir bir parametreye çevrilir.
<i>Değişim</i>	Direnç Voltaj	İndüktans Akım
<i>Tepki</i>	Hızlı Fotonun enerjisine/sayısına bağlı	Yavaş Fotonun enerjisinden bağımsız
<i>Örnek</i>	Fotovoltaik (voltaj/akım) Fotoiletken (direnç/iletkenlik) Fotoyayılım (fotokatot) Fotoelektromanyetik	Bolometre (direnç) Pyroelektrik (sığa) Termoçift (voltaj) Golay hücresi (mekanik yerdeğiştirme)

Isıl dedektör: Bolometre

Aktif bölgelerinde sentetik elmas, germanyum, silisyum, nikel, kobalt gibi malzemelerin kullanıldığı bolometreler, 10 – 5000 μm dalgaboyu aralığını algılayabilirler. Ancak, algılanması istenen dalgaboyuna göre sistemde uygun optik filtrelerin kullanılması ve aktif bölge boyutunun doğru ayarlanması gerekmektedir: Gelen ışınımın yapı tarafından soğrulabilmesi için aktif bölge boyutu algılanması istenilen dalgaboyundan büyük olmalıdır.



Şekil 5. Bolometre yapısı ve çalışma ilkesinin şematik gösterimi. Sistem içindeki iki özdeş bolometreden bir tanesinin üzerine ışıma gelmesi engellenerek referans olarak kullanılır. R_1 , R_2 ve R_3 dirençlerinin özdeş olması durumunda orta koldan akım geçmez. Aktif yapı üzerine düşen ışınımın yarattığı direnç değişikliği, orta koldan ölçülebilir bir akım geçmesine sebep olur.

Küçük enerjili ışınının (büyük dalgaboyu) algılanabilmesi için ısı yalıtımı iyi olan aktif bölgenin askıda tutulduğu tasarımlarda, bağlantı noktalarının büyüklüğü mikrobolometrenin performansını belirler. Küçük bağlantı noktalı yapılarda, ısı iletim düşük olduğundan yüksek algılayabilirlik değerlerine ulaşılabilir ancak ısınan bölgenin tekrar eski sıcaklığına dönmesi uzun zaman alacağından, tepki süresi uzundur (yavaş). Büyük bağlantı noktalı yapılarda ise, ısı iletim fazla olduğundan algılayabilirlik değerleri daha düşüktür ve tepki süresi daha kısadır (hızlı). Uzun zamandır, Mikro-Elektro-Mekanik-Sistemler (MEMS) başlığı altında yapılan çalışmalar sonucunda bugün, mikrobolometre üretim yetenekleri Türkiye’de gelişmiş durumdadır [8].

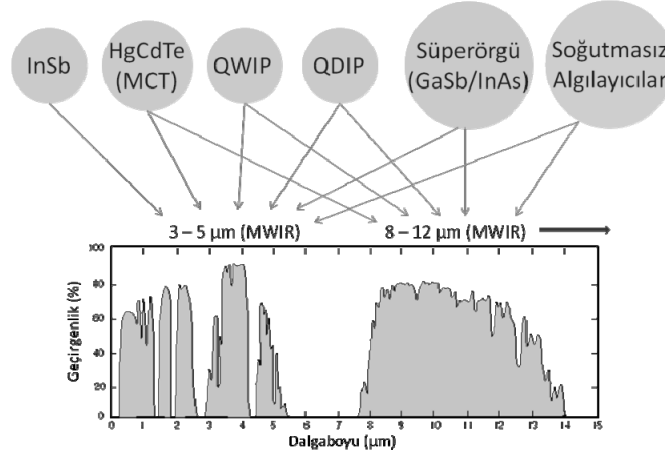
Bolometreler astronomide, kozmik mikrodalga arkaplan ışımasını ölçmek ve yıldız oluşum süreçlerini incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Örümcek ağı şeklinde birbirlerine bağlanarak oluşturulan aktif sistemler, farklı dalgaboylarını algılayacak şekilde tasarlanmışlardır (Şekil 6). Örneğin, BLAST olarak bilinen ve balonla taşınan büyük açıklıklı milimetre-altı teleskopta bulunan 3 tane Silisyum Nitrat (SiN) bolometre dizini 250, 350 ve 500 μm dalgaboylarını algılamaktadır. Bunlar sırasıyla, 149, 88 ve 43 tane dedektörden oluşmaktadır [9]. (BLAST: Balloon-borne Large-Aperture Submillimeter Telescope)



Şekil 6. Astronomide kullanılan ‘örümcek ağı’ bolometre yapıları. [10]

Foton Dedektörler: Yaygın Kızılötesi Algılayıcı Teknolojileri

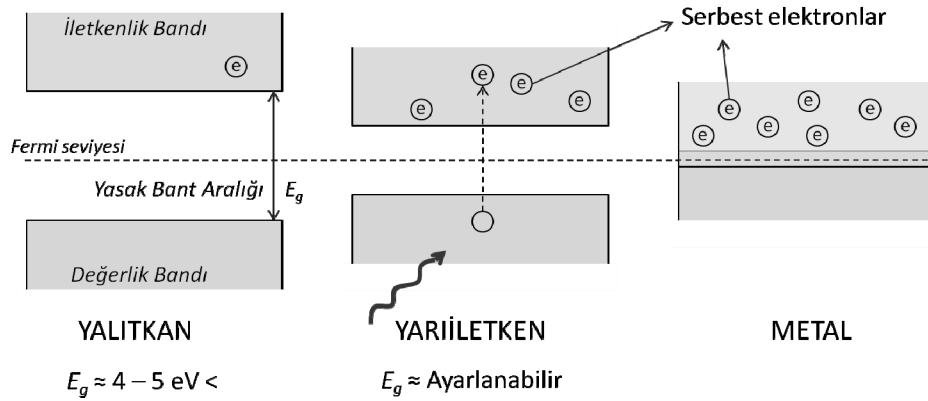
Algılama mekanizmalarına ve çalışma bölgelerine bağlı olarak en çok kullanılan yarıiletken dedektör malzemeleri Şekil 7’de gösterilmiştir. InSb (indiyum antimon) ve HgCdTe (MCT – cıva-kadmiyum-telür) dedektörler, 1950’li yıllardan beri kullanılmakta olan yüksek performanslı malzeme sistemleridir. Göreli olarak daha yeni olan kuantum kuyu (QWIP – Quantum Well Infrared Photodetector) ve GaSb/InAs (galyum antimon/indiyum arsenik) tabanlı tip-II süperörgü yapılı kızılötesi algılayıcı sistemler ise, sırasıyla 1980’li yılların ortalarından ve 2000’li yıllardan bu yana çokça çalışılmaktadır.



Şekil 7. Günümüzde yaygın olarak kullanılan kızılötesi foton algılayıcı teknolojileri ve çalıştıkları atmosfer pencereleri.

Yarıiletkenlerde Algılama

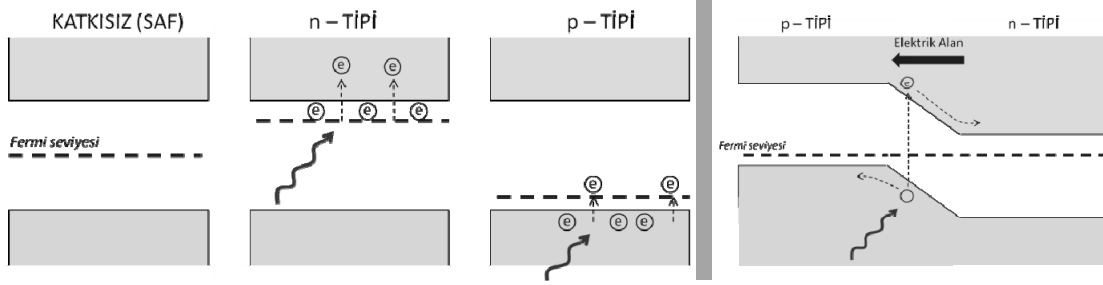
Yarıiletken malzemelerde, yasak bant aralığı olarak tanımlanan ve yapı içindeki değerlik elektronlarının serbest kalmak için ihtiyaç duydukları en küçük enerjiye karşılık gelen değer, yaklaşık olarak 0,2 eV ile 3–4 eV aralığındadır. Şekil 8’de gösterildiği gibi, değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasındaki bu enerji değeri, yalıtkan malzemelerde 4–5 eV ve üzerinde, iletkenlerde (metal) ise eksidir yani bantlar birbirinin içine girmiştir. Yarıiletken bir malzeme üzerine gelen fotonun enerjisi, değerlik bandındaki bir elektronu uyararak iletkenlik bandına çıkartmaya yetecek kadar olduğunda, yapı tarafından soğrulur ve böylece algılama gerçekleşir. Dolayısıyla, yarıiletken malzemenin yasak bant aralığı, algılanacak fotonun en küçük enerjisini (yani en büyük dalgaboyunu = kesim dalgaboyu) belirler. Örneğin, 300 K oda sıcaklığındaki bant aralığı 0,170 eV olan InSb ile algılanabilecek fotonların dalgaboyu en büyük 7,3 μm ’dir: daha büyük dalgaboyuna sahip fotonların enerjileri, elektronları iletkenlik bandına geçirebilmek için yeterli olmadığından bu malzeme ile algılanamazlar. HgCdTe gibi üçlü bileşiklerde, yasak bant aralığı, bileşeni oluşturan elementlerin oranlarının değiştirilmesi ile ayarlanabilir: $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ olarak gösterilen bu üçlü bileşikteki Cd oranı değiştirilerek kesim dalgaboyu 0,7–25 μm aralığında ayarlanabilir. HgCdTe, $x=0,2$ için 8–14 μm ve $x=0,3$ için 3–5 μm atmosfer penceresinde kullanılabilir/kullanılmaktadır.



Şekil 8. Yalıtkan, yarıiletken ve iletkenin enerji bant seviyelerinin şematik gösterimi. Yarıiletken malzemelerde, değerlik bandındaki elektronların iletkenlik bandına uyarılmasıyla algılama gerçekleşir.

Yarıiletken kızılötesi fotodedektörlerde başka bir algılama yöntemi, katkı atomlarının yasak bant içinde oluşturdukları enerji seviyelerinin kullanılmasıdır. Şekil 9’da şematik olarak gösterildiği gibi, n-tipi yarıiletkenlerde algılama, verici atomlarının yasak bant içinde, iletkenlik bandına yakın bir yerde yarattıkları enerji seviyesinde bulunan elektronların, gelen foton tarafından iletkenlik bandına uyarılmasıyla gerçekleşir. Bu enerji seviyesi, yarıiletkene ve katkı atomlarına bağlı olarak değişir. Tablo 2’de bazı yarıiletkenlerdeki katkı enerjileri ve buna karşılık gelen kesim dalgaboyları ile diğer dedektör parametreleri gösterilmiştir.

27 Ağustos – 1 Eylül 2012 Malatya



Şekil 9. Sol: Katkılı ve katkısız yarıiletkenlerde enerji bant seviyelerinin şematik gösterimi. Algilama, katkı seviyeleri üzerinden olmaktadır. Sağ: p-n eklemi şematik gösterimi.

Bahsedilen algılama mekanizmalarında, iletkenlik bandına uyarılan elektronun ve değerlik bandındaki boşluğun dedektör yapısı içinde akım oluşturabilmesi için bir elektrik alan yardımıyla kontak bölgelerine sürüklenmesi gerekmektedir. Sürükleyici elektrik alan, yapıya dışarıdan uygulanan potansiyel fark (voltaj) ile yaratılmaktadır ki bu durum dedektör sistemine bir yük getirmektedir. Şekil 9 sağ panelde gösterildiği gibi, bir p-n eklem yapısındaki içsel elektrik alan, oluşturulan elektron-boşluk çiftlerini kontak bölgelerine sürükleyerek sistemin harici voltaj ihtiyacını azaltır. Yarıiletken yapılar üzerine gelen fotonun uyarmasıyla oluşan elektron-boşluk çiftleri, verimli bir şekilde birbirlerinden uzaklaştırılmadıkları takdirde, yeniden birleşerek kaybolurlar. Böylece yapı içinde bir akım oluşturulmadığından gelen foton algılanamamış olur.

Tablo 2. Silisyum ve germanyum için safsızlık atomları katkılı dedektör parametreleri.

Malzeme: Katkı Atomu	Safsızlık Miktarı (cm^{-3})	Enerji (eV)	Dalgaboyu (μm)	Çalışma Sıcaklığı (K)
Si: As	3×10^{16}	0,052	24	10
Si: P	3×10^{16}	0,045	28	4
Si: Ga	3×10^{16}	0,073	19	18
Si: In		0,155	8	45
Ge: Cu	3×10^{16}	0,041	29	4
Ge: Hg	8×10^{15}	0,088	14	30
Ge: In		0,033	38	4
Ge: Zn		0,0104	118	2

QWIP – Kuantum Kuyu Kızılötesi Fotodedektörler

Yasak bant aralığı küçük bir yarıiletken malzeme, bant aralığı daha büyük başka bir yarıiletken arasında sıkıştırılırsa, eldeki sistem kuantum fiziğinden bildiğimiz potansiyel kuyu problemine benzer (Şekil 10). Birinci malzemenin iletkenlik (değerlik) bandındaki elektronlar (boşluklar) iki boyutta serbest hareket edebilirlerken bir boyutta sınırlandırılmışlardır. Bu durumda, Schrödinger denklemi ve dalga fonksiyonu

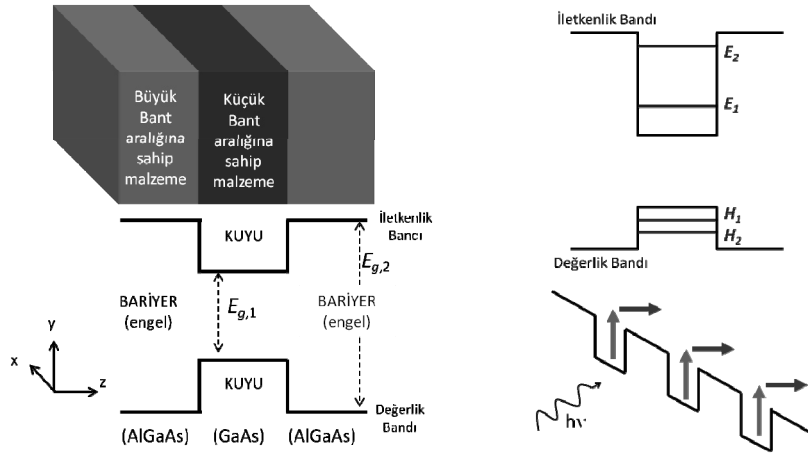
$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \nabla^2 \Psi(\vec{r}) + E_C(\vec{r}) \Psi(\vec{r}) = E \Psi(\vec{r}) \quad , \quad \Psi(\vec{r}) = C \Psi(z) e^{ik_x x} e^{ik_y y} \quad (2)$$

şeklinde yazılır. Yeterince “derin” kuyular için bu problem çözüldüğünde, kuyu içindeki taşıyıcıların (elektronlar, boşluklar) sahip olabileceği enerjiler

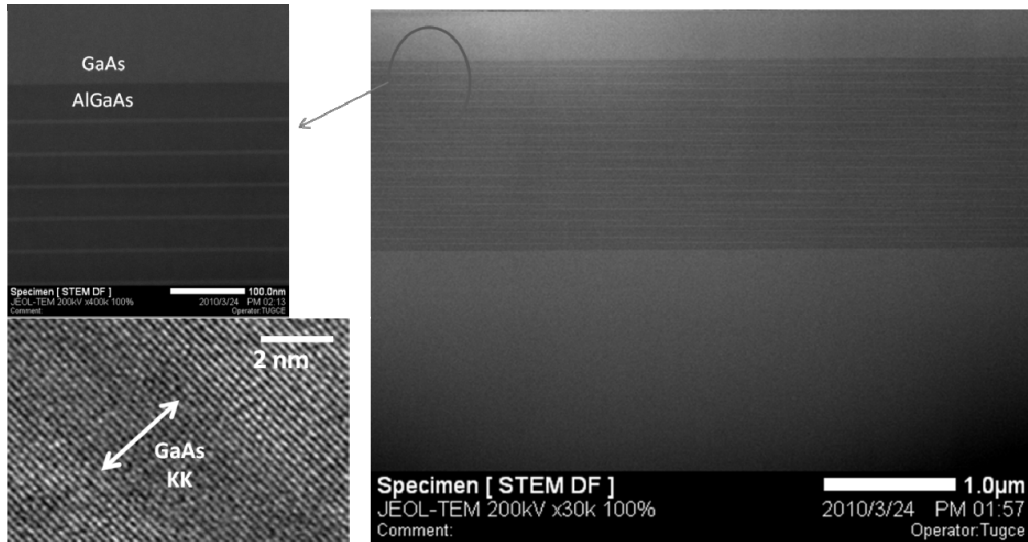
$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{n\pi}{W} \right)^2 \quad (3)$$

27 Ağustos – 1 Eylül 2012 Malatya

olarak bulunur. Burada m^* : taşıyıcıların etkin kütlesi, w : kuyu genişliği ve n : tam sayıdır. Kuantum kuyulu yapılar üzerine gelen fotonun algılanması, kuyu içindeki taşıyıcıların (elektron, boşluk) gelen foton tarafından potansiyel kuyu dışına uyarılması ve dışarıdan uygulanan elektrik alan yardımıyla kontak bölgelerine sürüklenmesiyle olur (Şekil 10). Elektronların kuyu içindeki enerji seviyeleri ve kuyunun yüksekliği, kuyunun genişliği ve seçilen malzemeye göre değiştirilebildiğinden, QWIP dedektörlerde kesim dalgaboyu amaca uygun olarak ayarlanabilir. Bahsedilen tabakaların çok ince olması ($\sim 2-10$ nm), aktif bölgenin küçük, algılanan foton sayısının az olması anlamına gelmektedir. O nedenle, kuantum kuyulu kızılötesi fotodedektörlerde, kuyu-engel ikili yapı ardışık olarak çok defa tekrar edilerek soğrulma merkezleri artırılır. Şekil 10'da, çok tekrarlı yapıda algılama şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 11'de ise, büyütülen gerçek bir kuantum kuyu fotodedektör yapısının geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri verilmiştir.



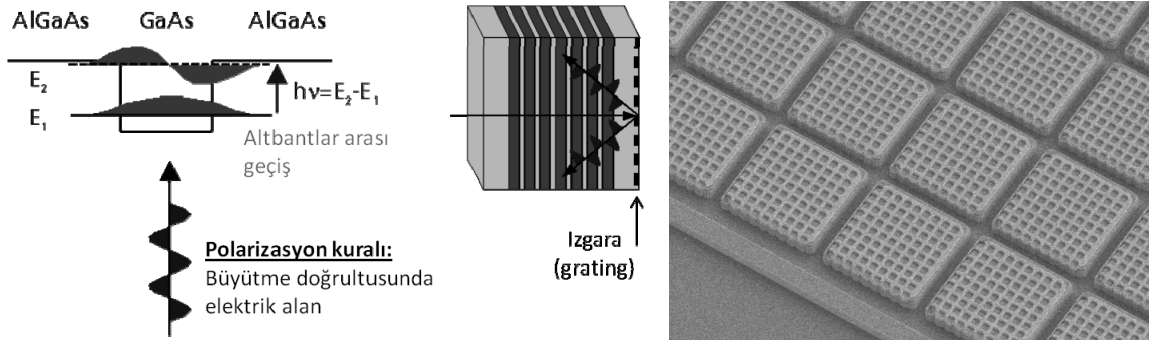
Şekil 10. Kuantum kuyu kızılötesi dedektör yapılarında enerji bant seviyelerinin şematik gösterimi. Algılama, bir boyutta sınırlamanın etkisiyle oluşan tanımlı enerji seviyelerindeki elektronların kuyunun dışına uyarılması ve elektrik alan yardımıyla kontak bölgelerine sürüklenmesiyle olur.



Şekil 11. GaAs/AlGaAs çok tekrarlı kuantum kuyu yapıların TEM görüntüsü [11].

Kuantum kuyu yapıları fotodedektörler üzerine gelen fotonun algılanabilmesi için, gelen fotonun elektrik alan vektörünün sınırlama doğrultusunda olması gerekmektedir. Bu nedenle, QWIP'ler yüzeylerine dik gelen ışıma tepki vermezler. Kuantum mekaniksel bu sınırlamanın aşılabilmesi için, yapının yüzeyine, gelen fotonun dalgaboyuna uygun olacak

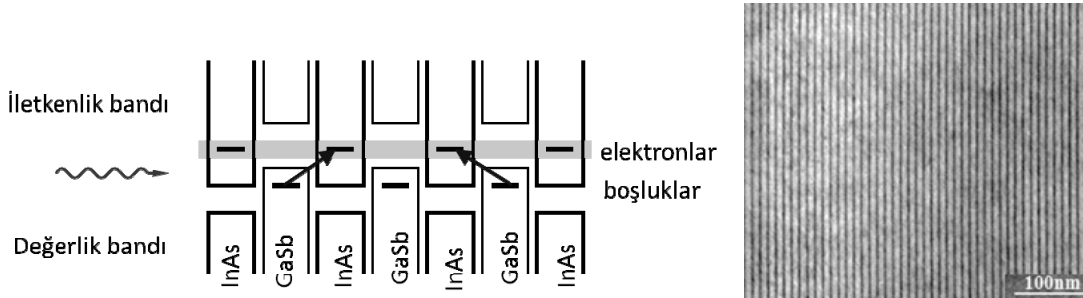
şekilde bir ızgara (grating) yapılır. Bu ızgara, tabakalara dik (sınırlama doğrultusunda) gelen fotonların saçılmasına ve elektrik alan doğrultularının değişmesine sebep olur; böylece, algılanabilirlik koşulu sağlanır (Şekil 11). Polarizasyon bağımlılığı nedeniyle, kuantum kuyu kızılötesi fotodedektörlerde kuantum verimi düşüktür (~%15–20).



Şekil 11. QWIP yapılarında polarizasyon kuralı ve piksellerin üzerindeki ızgaraların taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü [12]. Fotonların elektrik alan vektörleri, sınırlamanın olduğu doğrultuda olmalıdır.

GaSb/InAs Tip-II Süperörgü Yapılar

QWIP yapılarında, kuyular arasındaki engel (bariyer) genişliklerinin 20–30 nm mertebesinde olması, ardışık kuyular içindeki elektronların dalga fonksiyonlarının birbirleriyle etkileşmemesini dolayısıyla kuyular arasında tünellemenin olmamasını sağlar. Bu kalınlıkların 2–5 nm kalınlığında olması, ardışık kuyuların etkileşmesi sonucunda bant içinde mini-bantların oluşmasına sebep olur. Yarıiletken katmanlarının ardışık olarak oluşturdukları periyodik yapının örgü sabitini yarıiletkenlerin örgü sabitleri yerine ardışık yapının periyodu belirlediği için *süperörgü* olarak adlandırılırlar. Ardışık tabakaların bant hizalanması, yukarıda bahsedilen kuantum kuyu yapılarından farklı olarak Şekil 12’de görüldüğü gibi birbirlerinin içine geçmesi sonucunda ise tip-II süperörgü yapılar oluşur.



Şekil 12. GaSb/InAs Tip-II süperörgü yapının enerji bant seviyelerinin şematik gösterimi. Sağ: kesitten TEM görüntüsü.

Süperörgü yapılarında, GaSb ve InAs tabakalarının kalınlıkları değiştirilerek aktif bant aralığı yani algılanan ışığın dalgaboyu ayarlanabilir: InAs tabakasının kalınlığının azalmasıyla sınırlı/tanımlı enerji seviyesi yukarıya itildiğinden aktif bant aralığı artar ve kesim dalgaboyu küçülür. GaSb tabakasının kalınlığının azalması ise ardışık InAs tabakalarında hapsedilen elektronların dalga fonksiyonlarının birbirleriyle etkileşmesini arttırdığı için kesim dalgaboyunun azalmasına sebep olur. Polarizasyon bağımlılığı olmadığından yüksek kuantum verimi elde edilebilir, hızlı algılama yapılabilir.

Foton Dedektörlerin Karşılaştırması

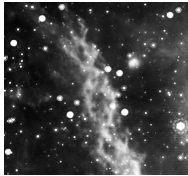
Yukarıda bahsedilen ve bugün Türkiye’de de çalışılan HgCdTe, QWIP ve Tip-II Süperörgü sistemler, günümüzde en çok kullanılan dedektör teknolojileridir. 3. Nesil olarak adlandırılan, büyük formatlı, okuma devreli, iki veya çok bantta/renkte algılama yapabilecek şekilde tasarlanabilen bu teknolojilerin karşılaştırması Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Günümüzde yaygın olarak kullanılan 3. Nesil kızılötesi fotodedektör teknolojilerinin karşılaştırılması.

Teknoloji	Kuantum verimi Çalışma sıcaklığı Tepki süresi	Çok renk yeteneği	Teknolojik olgunluk	Düzensizlik	Tekrar edilebilirlik Büyük alttas mevcudiyeti & Fiyatı
HgCdTe	✓	✓	✓	X	X
QWIP	X	✓	✓	✓	✓
Tip-II Süperörgü	✓	✓	X ✓	✓	✓ X

Hepsi Astronomide Var!

Bahsedilen foton dedektörlerin hepsi, farklı uygulama alanlarında kullanıldığı gibi Astronomi’de de kullanılmaktadır. Aşağıda, Astronomi uygulamalarında kullanılan yarıiletken kızılötesi fotodedektörlerin bazıları referans olmaları açısından örnek olarak verilmiştir.



Spitzer

IRAC (InfraRed Array Camera)

IRS (Infrared Spectrograph)

MIPS (Multiband Imaging Photometer)

: InSb, InSb:As (256 x 256)

: InSb:As, Si:Sb (128 x 128)

: Si:As (128 x 128)

Ge:Ga (32 x 32, 2 x 20)

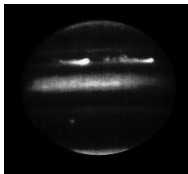


UKIRT

(UK Infrared Telescope)

Wide Field Camera (WFCAM)

HgTeCd (2048 x 2048)



SpeX

NASA IRTF

(Infrared Telescope Facility)

InSb (1024 x 1024)



NASA Landsat Uydusu

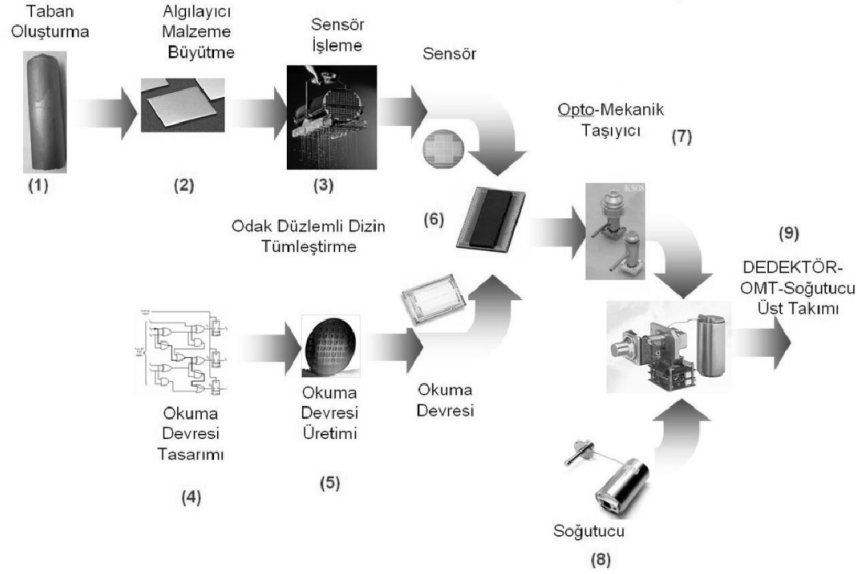
LDCM (Landsat Data Continuity Mission)

GaAs/AlGaAs QWIP (640 x 512)

(Ocak 2013’de yörüngeye yerleştirilmesi planlanmaktadır)

Fotodedektör Üretim Süreci

Bir fotodedektör sisteminin üretim süreci Şekil 13’de sıralanan basamaklardan oluşmaktadır. Şekil, öz açıklamalı olduğundan basamaklardan metin içinde yeniden bahsedilmemiştir. Kendi içinde çok sayıda alt basamaktan oluşan her kademe, ayrıntılı ve titiz bir çalışma süreci gerektirmektedir.

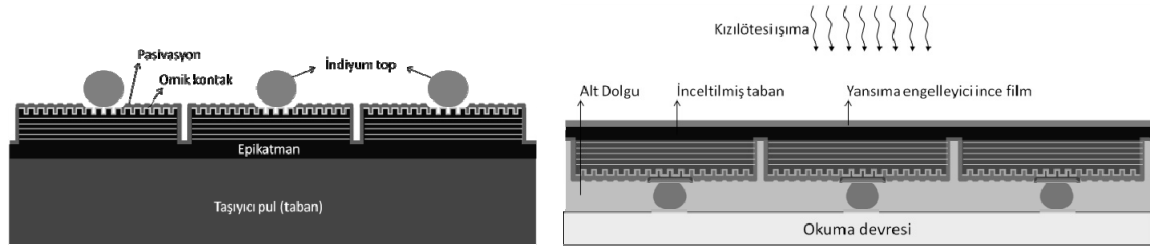


Şekil 13. Fotodedektör üretim süreci. Kırmızı sayılar, işlem basamak sırasını göstermektedir.

Örnek olması bakımından, bir QWIP fotodedektör sensör (foton algılayıcı birim) üretimi ve okuma devresiyle birleştirilmesinin temel basamakları sırasıyla aşağıda numaralandırılarak kısaca açıklanmış, Şekil 14’de şematik olarak gösterilmiştir.

- *Epitaksiyel büyüme*: Şekil 11’de görülen çok tekrarlı tabakalı yapının taşıyıcı pul üzerine oluşturulmasıdır. Büyütme işlemi, moleküler demet epitaksi (MBE) gibi atomik mertebede kontrol sağlayan sistemlerle yapılır.
- *Masatepe aşındırma (piksel tanımlaması)*: Malzeme sistemine uygun olarak seçilen kimyasal aşındırıcılar kullanılarak yüzeyin bir kısmının aşındırılması ile algılamanın yapılacağı aktif bölgeler (pikseller) oluşturulur.
- *Izgara oluşturma*: Gelen fotonları saçarak yukarıda bahsedilen polarizasyon koşulunu sağlayabilmek için, masatepelerin üzerlerine, derinliği ve periyodu algılanacak dalgaboyuna göre belirlenen ızgara deseni yapılır.
- *Omik kontak kaplama*: Yapı içinde üretilen fotoelektronların sürüklenmesini sağlayan elektrik alanı yaratmak ve dış devreye taşınmasını sağlamak için elektriksel iletkenlik sağlayan kontak noktalarıdır. Bu aşamada, çalışılan malzeme sistemiyle uyumlu metaller seçilmelidir.
- *Pasivasyon kaplama*: Yüzeydeki kopuk bağlar nedeniyle oluşan ve istenmeyen kaçak akımların baskılanması için açıkta kalan kısımlar özel yalıtkan bir malzeme ile kaplanır. Böylece, karanlık akım diye tanımlanan, dedektöre ışık düşmediği durumda da yapı içinden akan akım azaltılır.
- *İndiyum top kontak oluşturma*: Oluşturulan masatepe yapılar (odak düzlem dizini – FPA) ile okuma devresinin bütünleşmesini sağlayacak olan iletken, yumuşak kontak noktalarıdır. Her bir masatepenin ortasına yerleştirilir.

- *Okuma devresi ile bütünleştirme*: Her bir pikselin üzerinde indiyum toprakların olduğu odak düzlem dizin yapısı, ters çevrilerek kendisi ile uyumlu okuma devresi üzerine yerleştirilir. Böylece, her piksel üzerine düşen foton bilgisi bireysel olarak okunabilecektir.
- *Alt dolgu*: Odak düzlem dizin ile okuma devresi arasında kalan boşlukların bir dolgu maddesi ile doldurulmasıdır. Bu dolgu maddesi, bir sonraki aşama olan taban inceltme sırasında yapının zarar görmesini engellemek amacıyla fiziksel destek olarak kullanılmaktadır.
- *Taban inceltme*: Epikatman yapıların üzerine büyütüldüğü taşıyıcı pulun (taban) fiziksel ve kimyasal yöntemlerle inceltmesidir. Ön tarafta okuma devresi olduğu için arka yüzeyden gelen fotonların, aktif bölgeye ulaşabilmeleri için bu kalın taşıyıcı pul içinden geçmesi gerekmektedir. Bu esnada, fotonların bir kısmı taban tarafından soğrularak kaybolurlar. Bu kayıpların en aza indirilmesi için taban inceltmesi yapılır.
- *Yansıma engelleyici tabaka kaplama*: Yapı üzerine gelen fotonların yüzey tarafından yansıtılmasını engellemek amacıyla yüzey, yansıma engelleyici ince film ile kaplanır. Yansıma engelleyici filmler, dedektörün aktif olduğu dalga boyuna bağlı olarak değişiklik gösterir.



Şekil 14. QWIP odak düzlem dizini ve okuma devresiyle birleştirilmesinin şematik gösterimi.

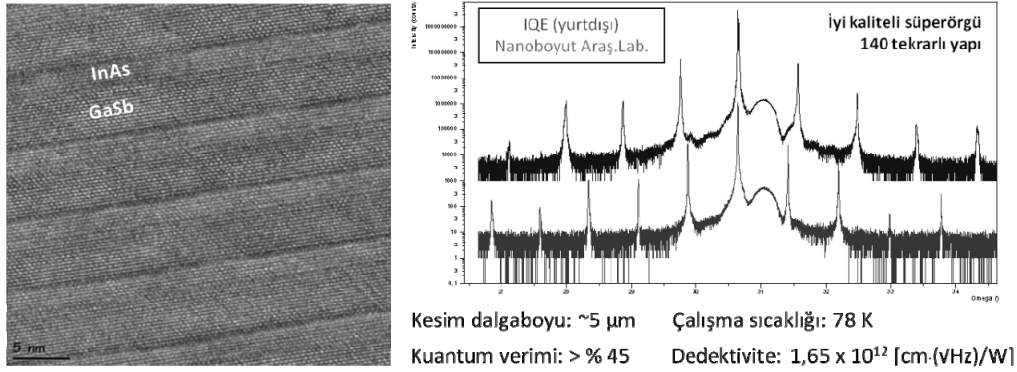
Türkiye...

Türkiye’de, özellikle Milli Savunma Bakanlığı (MSB) ve Savunma Sanayii Müsteşarlığı (SSM) gibi kurumların desteği ile askeri uygulamalar çerçevesinde kızılötesi fotodedektör geliştirilmesi projeleri son yıllarda olgunluk kazanmıştır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yeni nesil kızılötesi fotodedektör teknolojileri (Tablo 3), özellikle üniversite laboratuvarlarında uzun yıllardır çalışılmaktadır. Bu çalışmaların ilk zamanlarında, yurtdışından satın alınan epikatmanlar üzerinde teknoloji ve altyapı geliştirmesi yapılırken bugün, sınırlı sayıda olsa bile epikatman yapıların büyütülmesi de Türkiye’de bazı üniversite laboratuvarlarında yapılabilmektedir. Bugün itibarıyla, yukarıda bahsedilen dedektör yapıları büyütülebilmekte, odak düzlem dizin haline getirilebilmekte, okuma devresi tasarlanıp üretilenmekte ve görüntü alınabilmektedir.

Son yıllarda dünyada üzerine çok yatırım yapılan ve gelecek için büyük umut vaat eden GaSb/InAs tabanlı süperörgü fotodedektör teknolojisi de, 2009 yılının sonunda başlatılan bir proje ile Türkiye’de çalışmaya başlanmıştır. *GaSb/InAs Kızılötesi Fotodedektör Teknolojisi Geliştirilmesi Projesi* (KÖFDE) isimli bu proje, savunma Ar-Ge Yol Haritası kapsamında oluşturulan Mükemmeliyet Ağları programı kapsamındaki Mikro-Nano-Teknolojiler alt grubunda yer almaktadır. Proje, süperörgü malzeme tasarımı, büyütülmesi/geliştirilmesi ile test ve doğrulanması aşamalarını kapsamaktadır. Aselsan A.Ş.’nin yürütücülüğünü yaptığı projede Anadolu, Bilkent ve Orta Doğu Teknik Üniversiteleri ortak çalışmaktadır. Aralık 2012’de tamamlanması planlanan projede süperörgü yapılar başarıyla büyütülmüş ve literatürde verilen performans değerleriyle

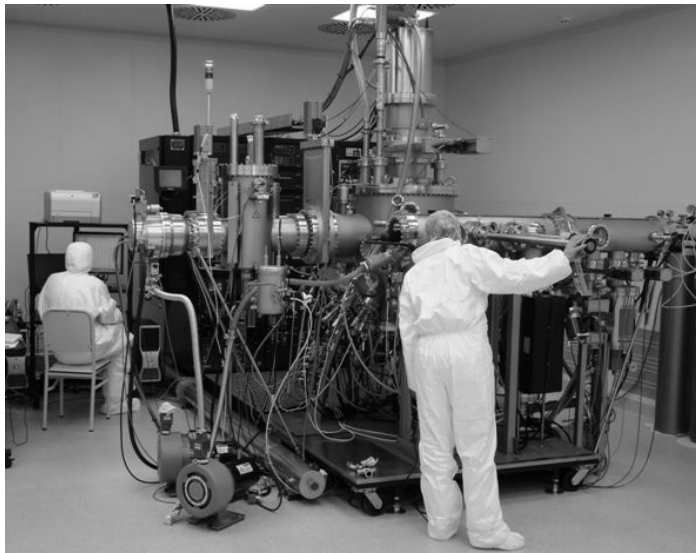
27 Ağustos – 1 Eylül 2012 Malatya

karşılaştırılabilir değerler elde edilmiştir. Şekil 15’de, Anadolu Üniversitesi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı’nda büyütülen bir süperörgü yapının kesit TEM görüntüsü ve elde edilen dedektör parametreleri verilmiştir.

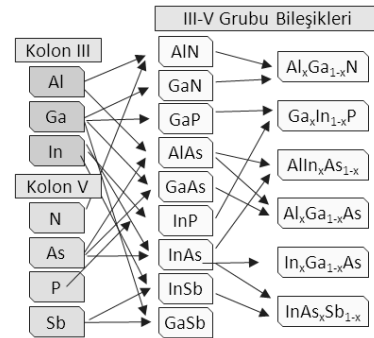


Şekil 15. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı’nda büyütülen GaSb/InAs süperörgü yapı. Sol: Kesitten TEM görüntüsü. Sağ: Kristal kalitesini gösteren XRD sallantı eğrisinin yurtdışında ticari bir kuruluşa büyüttürülen kontrol örneği ile karşılaştırılması ve dedektör parametreleri.

Ayrıntılarından bahsedilen epikatman büyütme ve fotodedektör fabrikasyon işlerinin yapılması, özel tasarlanmış cihazlar ve laboratuvarlarda yapılmaktadır. Örnek olması bakımından, Anadolu Üniversitesi Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı’nda bulunan MBE cihazı Şekil 16’da gösterilmiştir. Türkiye’de bulunan sistemler içinde en donanımlısı olan Veeco GEN20 MC marka/model bu MBE cihazı, III-V grubu elementlerinin büyütülebilmesi için tasarlanmıştır. Toplam 12 hücreli sistemle, 4 inç ($\sim 100 \text{ mm}$) büyüklüğe kadar olan tabanlar üzerine büyütme yapılabilmektedir. Şekil 17’de ise, bir dedektör üretimi ve karakterizasyonu için kullanılan laboratuvar ortamı gösterilmiştir.



Ana Elementler	Katkı Malzemeleri
Ga: Galyum	Si: Silisyum
In: İndiyum	Be: Berilyum
Sb: Antimoni	GaTe: Galyum Telür
As: Arsenik	
Al: Alüminyum	
N: Azot	
P: Fosfor	



Şekil 16. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı’nda bulunan moleküler demet epitaksi (MBE) cihazı ve malzeme kapasitesi. Bu malzemelerin ikili, üçlü ve dörtlü bileşikleri yapılabilmektedir.



Şekil 17. Test dedektörü üretimi ve karakterizasyonu için kullanılan laboratuvar ortamı (Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı).

SONUÇ

Dünyada büyük gözlemlerinin hemen hepsinde var olan kızılötesi bölgede algılama yeteneğinin Türkiye’de de geliştirilebilmesi için ülkemizde yeterli bilgi birikimi ve altyapı vardır. Dolayısıyla, özellikle savunma araştırma-geliştirme yol haritası kapsamında geliştirilen kızılötesi fotodedektör teknolojisinin astronomiye uyarlanması görece olarak daha rahat olacaktır. Hareketli sistemlerde kullanılan algılayıcı sistemlerinin küçük, hızlı, yüksek sıcaklıkta çalışabilir olması gibi sınırlayıcı ve zorlayıcı koşulları, astronomi uygulamalarında geçerli değildir. Bir teleskopla eşlenecek kızılötesi dedektörün hareketsiz bir sistem olması, fiziksel olarak daha büyük sistemlerin kullanılabileceği anlamına gelmektedir ki bu durumda bahsi geçen zorlayıcı unsurların birçoğu devre dışı kalmaktadır. Yapılması gereken, kızılötesi astronomi için koşulların/ihtiyaçların tanımlanması ve var olan imkânların bu çerçevede kullanılabilmesini sağlamaktır.

Ülkemizde Astronomi uygulamalarında kullanılmak üzere kızılötesi dedektör geliştirilmesi konusunda bir girişim yoktur. Ancak, bu konuda bir projenin bir an önce başlatılması ve zaman kaybetmeden kızılötesi astronominin gelişmesi sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.spitzer.caltech.edu/images/>
- [2] http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/image_galleries
- [3] <http://irsa.ipac.caltech.edu/IRASdocs/iras.html>
- [4] <http://www.spitzer.caltech.edu/>
- [5] P. Kammerer, E. Zolda, R. Sablatnig, *4th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, 1–9 (2003)
- [6] <http://www.bbc.co.uk/news/world-13522957>
- [7] <http://www.nrich.go.kr/eng/ArchitecturalHeritage/Architecture.jsp>

- [8] D. Sabuncuoglu Tezcan, *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ (2002)
- [9] E. Pascale ve ark., *The Astrophysical Journal* **681**, 400-414 (2008)
- [10] <http://www.blastexperiment.info/>
- [11] T. Karakulak, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniversitesi (2010)
- [12] A. Bezinger ve ark., *IEE Electronics Letters* **43**, 685 (2007)