

**NANOELEKTRONİKTE MOLEKÜLER VE
NANO ÖLÇEKTEKİ CİHAZLAR**

Beyza ALCAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2006
ANKARA**

Beyza ALCAN tarafından hazırlanan NANOELEKTRONİKTE MOLEKÜLER VE NANO ÖLÇEKTEKİ CİHAZLAR adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Mustafa BURUNKAYA
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr İnan GÜLER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Mustafa BURUNKAYA

Üye : Prof. Dr. Çetin ELMAS

Üye :Yrd. Doç. Dr. Yılmaz SAVAŞ

Üye :Yrd. Doç. Dr. H. Hüseyin SAYAN

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur

**NANOELEKTRONİKTE MOLEKÜLER VE
NANO ÖLÇEKTEKİ CİHAZLAR
(Yüksek Lisans Tezi)**

Beyza ALCAN

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ocak 2006**

ÖZET

Son zamanlarda, mikron-ölçek veya mikroelettronik cihazların yerini kuantum mekaniksel etkiler kullanılarak çok daha küçük boyutlardaki nanometre ölçeğinde tasarlanan cihazlar almıştır. Nanoelettronik cihazları çok geniş uygulaması olan iki alanda incelenmektedir. Katı-hal kuantum etkili nanoelettronik cihazlar ve moleküler elektronik cihazlar. Öncelikle son birkaç yılda, moleküler ölçekteki lojik devre tasarımların gerçekleştirilmesinde çok önemli ilerlemeler olmuştur. Aynı zamanda moleküler cihazlar ve bu cihazların özelliklerinin anlaşılmasında faydalı olacak malzeme tipleri araştırılmıştır. Günümüzde çeşitli moleküllerin akıl almaz bir küçüklükte ve geleneksel silikon mikroçiplerdekinden bir milyon kez daha küçük anahtarlar, teller, transistörler, doğrultucular ve hafıza elemanları olarak kullanılabileceği kanıtlanmıştır ve pratik uygulamaları vardır. Bu çalışmadaki amaç, elektronikteki moleküler ve nano-ölçekli materyal ve cihazlar genel olarak incelenmiştir.

Bilim Kodu : 626.04.01
Anahtar Kelimeler : Nanoteknoloji, Nanoelettronik, Moleküler Elektronik, Kuantum Mekanik Etkileri, Karbon Nano tüpler, Moleküler Teller
Sayfa Adedi : 90
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Mustafa BURUNKAYA

**MOLECULAR AND NANOSCALE DEVICES IN
NANO ELECTRONICS
(M.Sc. Thesis)**

Beyza ALCAN

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2006

ABSTRACT

Recently, Micron-scale or microelectronic device will be replaced with new designs for devices that use of the quantum mechanical effects that dominate on the much smaller, nanometer scale. We can examine in two broad areas of nanoelectronic devices. That are Solid-state quantum-effect nanoelectronic devices and molecular electronic devices. Over the past several years, there have been many significant advances toward the realization of logic designs on the molecular scale. Also, i has been researched the types of materials that will be useful for understanding of the molecular devices and their properties. It has been demonstrated that different molecules could serve as incomprehensibly tiny switches, wires, transistor, rectifiers and storage devices one million times smaller than those on conventional silicon microchip. The purpose of this review is to provide a general introduction to molecular and nanoscale materials and devices in electronics.

Science Code	: 626.04.01
Key Words	: Nanotechnology, Nanoelectronics, Molecular Electronics, Quantum Mechanical Effects, Carbon Nanotubes, Molecular Wires
Page Number	: 90
Adviser	: Assist. Prof. Mustafa BURUNKAYA

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa BURUNKAYA'ya, engin bilgi ve tecrübesinden yararlandığım Sayın Prof. Dr. İnan GÜLER'e, ayrıca Hacettepe Nükleer Enerji Mühendisliği Araştırma Görevlisi Sayın Cihangir ÇELİK'E ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Raif BAYIR 'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. NANOTEKNOLOJİ VE ARAŞTIRMA SAHALARI	3
2.1. Nanobilimdeki Gelişmeler	3
2.2. Bilgi İşleme ve Bilgi Saklama Cihazları.....	5
2.3. Nano Ölçekli Malzemeler	7
2.4. Nano Ölçekli Malzemelerin Görüntülenmesi	11
2.5. Nano Ölçekli Malzemelerin Fabrikasyonu	12
2.6. Nano Ölçekte Kuantum Bilgi İşleme	13
2.7. Nanobilim ve Biyoteknoloji	14
3. NANOELEKTRONİK CİHAZLARA GENEL BAKIŞ	16
3.1. Katı-Hal Kuantum Etkili Nanoelektronik Cihazlar	16
3.1.1. Rezonans tünel cihazları	18
3.1.2. “Hibrit” mikroelektronik-nanoelektronik rezonans tünel transistörler...20	
3.2. Moleküler Elektronik Cihazlar	21
3.3. Nanoelektronik Cihazlardaki Zorluklar	23
4. MOLEKÜLER ELEKTRONİK CİHAZLAR	24

Sayfa

4.1. Moleküler Elektronik'in Gelişimi	24
4.2. Veri İşleme Cihazları	28
4.2.1. Moleküler doğrultucular	28
4.2.2. Moleküler teller	31
4.2.3. Moleküler transistörler	37
4.2.4. Moleküler devreler	46
4.3. Bilgi Depolama Cihazları	48
4.3.1. Moleküler Anahtarlar	48
4.3.2. Kendiliğinden düzenlenen tekil katman moleküler RAM.....	51
4.3.3. Polimer tabanlı cihazlar.....	55
4.3.4. Karbon nanotüp tabanlı bellek.....	57
5. MOLEKÜLER ELEKTRONİK İÇİN ÖRNEK UYGULAMALAR	63
5.1. Moleküler Elektronik Temelli Tam ve Yarım Toplayıcı	63
5.1.1. Bireysel Cihazların Birleştirilmesi	66
5.1.2. İletim Mekanizması	68
5.2. Nano Boyutta Moleküllü Anahtar Devresi.....	69
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	78
EKLER	83
EK-1 Nanoelektronik Cihazların Genel Karşılaştırmaları.....	84
EK-2 Moleküler Elektronik Cihazların Akım Yoğunluğu.....	85
EK-3 Diyot-Diyot Tip Moleküler Elektronik And Kapısı.....	86
Ek- 4 Diyot-Diyot Tip Moleküler Elektronik Or Kapısı.....	87
EK-5 Moleküler Anahtarlar İçin Kullanılan Moleküller.....	88
EK-6 İletken Polimer Yapıları.....	89
ÖZGEÇMİŞ	90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Moore Kanununa göre bilgisayarlarda kullanılacak transistör sayısı ve minyatürizasyonu.....	5
Şekil 3.1 Nanoelektronik elemanların sınıflandırılması.....	17
Şekil 3.2 Katı- hal rezonant tunelli diyotların çalışması.....	19
Şekil 3.3. Hibrit mikro – nano elektronik rezonant tunelli transistörler	21
Şekil 3.4. Moleküler elektronik rezonant tünel diyodu	22
Şekil 4.1. Elektronik cihazlarda molekülleri kullanan üç ana sınıfın örnekleri	26
Şekil 4.2. Hemiquinone'un kimyasal yapısı.....	29
Şekil 4.3. $C_{16}H_{33}-\gamma Q3CNQ$ 'un kimyasal yapısı.....	30
Şekil 4.4. Karbon zinciri tarafından köprülenen Rhenium metal merkezleri	33
Şekil 4.5. Karbon tüpün atom yapısı.	35
Şekil 4.6. Nanotüp kullanılarak yapılan alan etkili transistör şeması	39
Şekil 4.7. Nanotüp alan etkili transistörün şematik gösterimi.....	40
Şekil 4.8. Silikon çipler üzerine serili altın öncülerin ve tek duvarlı karbon nanotüplerin üç boyutlu AFM görüntüleri.....	40
Şekil 4.9. Transistör çalışmalarında kullanılan gerçek elektrot konfigürasyonunun AFM görüntüsü.....	41
Şekil 4.10. Moleküler modeller.....	43
Şekil 4.11. İki nanotüp FET kullanılarak bir gerilim invertörünün imalatı.....	47
Şekil 4.12. Çapraz NW dizi tabanlı adres kod çözücüler.....	47
Şekil 4.13. Moleküler akım anahtarının şematik resmi.....	51
Şekil 4.14. SAM cihaz üretiminin şeması.....	53
Şekil 4.15. Moleküler cihazın yapılanışı ve belleğin yonga plakası prensibi.....	55

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. Moleküler rasgele erişimli belleğin ölçülen lojik diyagramı.....	55
Şekil 4.17. FET bazlı CP diyagramı.....	56
Şekil 4.18. Askıda kalmış nanotüp cihaz mimarisi.....	58
Şekil 4.19. Bir Altın elektrot çiftini kapsayan metalik bir SWCNT'nin 4.2 K'daki akım-voltaj eğrileri.....	60
Şekil 4.20. Yüzey enerji işlemine göre seçici olarak yerleşmiş bir SWCNT.....	61
Şekil 5.1. İki diyot tabanlı moleküler lojik kapılardan yapılan bir moleküler elektronik yarım toplayıcı.....	64
Şekil 5.2 İki diyot tabanlı moleküler yarım ekleyici ve bir diyot tabanlı moleküler OR kapısından yapılan moleküler tam toplayıcı devresi	66
Şekil 5.3. Izgara tel yapısına dayanan nano boyuttaki devreler	70
Şekil 5.4. Temsili ızgara tel devrelerinin optik mikroskop, tarayıcı elektron Mikroskobu ve atomik kuvvet mikroskobu görüntüleri.....	71
Şekil 5.5. Bir 64-bit rastgele giriş belleği şeklinde ızgara tel.....	73

SİMGELER VE KISLATMALAR LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Al	Alüminyum
AlAs	Alüminyum Arsenit
Au	Altın
B	Bor
C	Karbon
C₆H₆	Benzen
Cd	Kadmiyum
CH₂	Metilen
Co	Kobalt
Fe	Demir
G⁺	Guanin Radikal Katyonu
GaAs	Galyum Arsenit
Nd	Neodimyum
Ni	Nikel
Pt	Platin
Pt	Platin
Se	Sezyum
SiO₂	Silisyum Oksit
SmCo	Samaryum Kobalt
Te	Tellür
Ti	Titanyum
π	π -tipi köprüleme metodu
σ	Doymuş kovalent sigma köprüsü
Ω	Direnç birimi

Kısaltmalar	Açıklama
ABS	Akrilonitril-Bütadien-Stiren
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
CNTFET	Karbon nanotüp alan etkili transistör
cNW-FET	Çapraz yarıiletken nano tel alan etkili transistör
DNA	Deoksiribo Nükleik Asit
D-S-A	Verici-Boşluk-Alıcı
eV	Elektron Volt
FET	Alan etkili transistör
GMR	Dev Manyetik Rezonans (Giant Magnetic Resonanse)
HOMO	Elektron Verici Taraftaki Boş Yörünge
Konjuge	Birleşmiş, Kümelenmiş
LB	Langmuir-Blodgett tekil katman
LUMO	Elektron Alıcı Taraftaki Boş Yörünge
MEMS	Mikro elektronik mekanik sistemler
MFM	Manyetik Kuvvet Mikroskobu
MWNT	Çok duvarlı nanotüpler
nm	Nanometre
PV	Fotovoltaikler
PVS	Polivinil Klorür
RAM	Rastgele Erişimli Bellek
RTD	Rezonant tünelli diyot
RTT	Rezonant tünelli transistör
SAM	Kendi Kendine Düzenlenen Tekil Katman
SAM	Kendiliğinden düzenlenen moleküller
SAM	Nitro-amonyum tek tabaka
SHPM	Taramalı Hall Aygıtı Mikroskobu
SPM	Taramalı uç mikroskoplar
STM, TTM	Tarama tünelli mikroskop
SWNT	Tek duvarlı nanotüpler

1. GİRİŞ

“Nano” anlam olarak, bir fiziksel büyüklüğün bir milyarda biri anlamına gelmektedir. Bir nano metre ise metrenin bir milyarda birine eşit bir uzunluk birimidir(1). Başka bir deyişle, bir nano metre içine yan yana ancak 2–3 atom dizilebilir; yaklaşık 100–1000 atom bir araya gelerek nano ölçeklerde bir nesneyi oluşturur. Bilinen birçok molekül de nano yapı tanımına girmektedir. 20. yüzyılın başlarında maddeyi oluşturan parçacıklardan, mesela elektronların hem parçacık hem de dalga gibi davrandığı ve bu ölçekteki yapılarda da belirsizlik kuramının (Belirsizlik Kuramı: bir parçacığın konumu ve hızının aynı anda belirlenemeyeceği belirtmektedir.) geçerli olduğu saptanmıştır (2). Bu temel öğelerden doğan kuantum mekaniği sayesinde atom ve moleküller doğru olarak algılanıp anlaşılmıştır. Temel bilimler ve ilgili teknolojiler hızla geliştirilmiş ve bu bilgiler ışığında yeni malzemeler de üretilmiştir (1).

1959 yılında fizikçi Richard Feynman tarafından, atomları yan yana dizme ve moleküllerin nano ölçekli cihazlar ve makinelerin yapımında temel eleman halinde yan yana kullanılabilceği fikri ileri sürülmüştür (3). Bu fikir 1980’lerin ortasında süpramoleküler kimya üzerine yapılan araştırmalar çerçevesinde şekillenmiştir. Süpramoleküler Kimya; moleküllerin fonksiyonel moleküller ya da molekül toplulukları oluşturmak üzere bir araya getirilmesinin “self assembly” kurallarını inceleyen ve moleküller arasındaki ve molekül içindeki etkileşimleri inceleyen bilim dalıdır (4). Son on yıldır, yapay moleküler ölçekteki malzemeler ve cihazlar üzerindeki araştırmalar, süpramoleküler kimya konusuna olan ilgiyi arttırmıştır, kimyasal reaksiyon mekanizmalarının ve elektron transfer işlemlerinin anlaşılmasında büyük ilerlemeler sağlanmıştır (1).

Moleküler elektronik; tek moleküller, küçük molekül grupları, karbon nano tüpler, nano ölçekli metalik veya yarıiletken kablolar kullanarak elektronik fonksiyonları yerine getiren teknoloji şeklinde tarif edilir. Moleküler özelliklerden faydalanan herhangi bir cihazın da moleküler elektronik cihaz olduğu söylenebilir. Moleküler

elektroniğin hedefi, çok büyük yoğunluktaki cihazları (örneğin moleküler kablolar, doğrultucular, opto-elektronik tetikleme anahtarları, transistörler ve bellekler gibi) üretebilmek için moleküler düzeyde sentez, montaj ve minyatürleştirmeden yararlanabilmektir (5).

Nonoteknolojinin amacı nano ölçekler seviyesinde malzeme tasarlayıp üretmeyi, bu malzemelerden yeni yöntemlerle aygıt ve aletler üretebilmektir (1). Bu nedenle nanoteknolojide kullanılan yöntemler, bilinen yöntemlerden çok farklı olabilmektedir. Bu çalışmada nanoteknoloji alanları ve nano elektronik aygıtları genel olarak incelenmekte, moleküler elektroniğin dünü, bugünü ve yarını konusu ele alınmaktadır. Özellikle nano elektronikte kullanılan moleküler ölçekteki ve moleküler yapıdaki cihazların elde edilmesindeki yöntem ve teknikler araştırılmaktadır. En önemlisi ülkemizde henüz yeni bir saha olan moleküler ve nano bilim araştırmalarına katkı sağlamak amaçlanmaktadır.

2. NANOTEKNOLOJİ VE ARAŞTIRMA SAHALARI

2.1. Nano Bilimdeki Gelişmeler

Nano kelime anlamı ile herhangi bir fiziksel büyüklüğün bir milyarda biri anlamına gelmektedir. Nano yapılar uzunluk olarak bakıldığında yaklaşık 10–100 atomluk sistemlere (10^{-9} metre) karşılık gelmektedirler. İnsan saç telinin çapının yaklaşık 100.000 nano metre olduğu düşünülürse ne kadar küçük bir ölçekten bahsedildiği daha rahat anlaşılabilir. Bir başka ifadeyle, bir nano metre içine yan yana ancak 2–3 atom dizilebilir, yaklaşık olarak 100–1000 atom bir araya gelerek nano ölçeklerde bir nesneyi oluşturabilir. Bu boyutlarda sistemlerin fiziksel davranışlarında normal sistemlere kıyasla farklı özellikler gözlemlenmektedir. Nano bilim ve nanoteknoloji olarak nitelendirilen bu farklılıklar yaklaşık 10 seneden beri dünya ülkelerinin sivil-askeri bilim ve teknoloji stratejilerini belirler hale gelmektedir (6).

Nano ölçek seviyesinde boyutlara sahip olan malzemelerin özellikleri büyük ölçekte boyutlara sahip malzemelerden tamamen farklı olup nano ölçeğe yaklaştıkça yararlı olay, yeni özellikler ve özel durumlar ortaya çıkmaktadır. Örneğin, iletim özellikleri (momentum, enerji ve kütle) artık sürekli olarak değil ancak kesikli olarak tarif edilmektedir. Benzer olarak, optik, elektronik, manyetik ve kimyasal davranışlar klasik değil kuantum olarak tanımlanmaktadır. Nanoteknolojide madde nano metre seviyesinde işlenmekte ve maddenin ortaya yeni çıkan değişik özellikleri kullanılmaktadır. Yeni teknolojik nano ölçekte aygıtlar ve malzemeler yapmak mümkün olmuştur. Örneğin, tarama tünelleme (TTM, STM) ve atomik kuvvet mikroskoplarını (AKM, AFM) kullanarak yüzey üzerinde atomları iterek birbirlerinden ayırmak ve istenilen şekilde dizmek mümkün olmuştur. Bütün bu gelişmeler, 19. yüzyılda dünyayı yeniden şekillendiren sanayi devrimine eşdeğer bir bilimsel ve teknolojik devrim başlatmıştır. Bu şekilde atom ve moleküller ile oynayarak tek molekülden oluşan transistör ve elektronik aygıtlar gerçekleştirilmiştir. Bütün bu çalışmalar ve gelişmeler elektronik, kimya, fizik, malzeme bilimi, uzay ve hatta sağlık bilimlerini bir ortak ara kesitte buluşturmuştur (1).

Önümüzdeki yıllar içerisinde nanoteknoloji sayesinde;

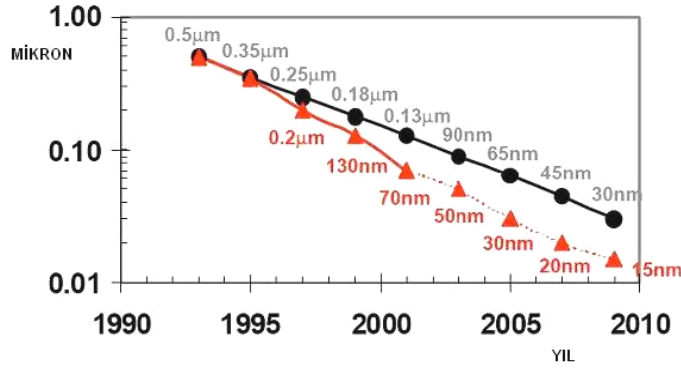
- Mikroskop altında görülebilen süper bilgisayarlar üretilebilecek,
- İnsan vücudunun içinde hastalıklı dokuyu bulup iyileştiren, ameliyat yapan nano robotlar bulunabilecek,
- İnsan beyninin kapasitesi ek nano hafızalarla güçlendirilebilecek,
- Kirliliği önleyen nano parçacıklar sayesinde fabrikalar çevreyi çok daha az kirletecek,
- Ulusal güvenliği ilgilendiren konularda nano malzeme bilimi, yeni savunma sistemlerinin geliştirilmesinde, haber alma ve gizlilik konularına yönelik çok küçük boyutlarda aygıtların yapılmasında kullanılacak,
- Birim ağırlık başına şu andakinden 50 kat daha hafif ve çok daha dayanıklı malzemeler üretilebilecek ve bunların sonucu olarak insanın günlük yaşamında kullandığı tekstil ürünleri gibi ürünler değişebilecek,
- Uzay araştırmalarında ve havacılıkta yeni roket ve uçak tasarımlarının ortaya çıkması mümkün olacaktır (1).

Nanobilim ve nanoteknolojinin odak noktaları;

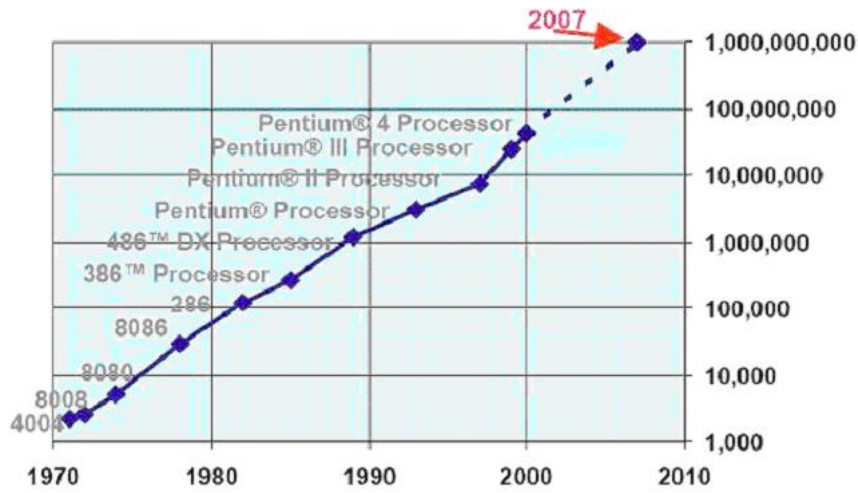
- Düşük boyutlar söz konusu olduğundan ağırlığı artan boyut, sınır ve kuvantum etkileri gibi temel fizik araştırması içeren konular,
- Atomik boyutlarda görüntüleme deneysel yöntemlerin geliştirilmesi,
- Angstrom altı boyutlarda (10^{-10} metreden küçük) ölçüm yapabilme teknikleri,
- Düşük boyutlarda eş tip malzeme (eş tip malzeme; aynı özellikleri içeren ama nano boyutlara sahip malzeme) üretebilme,
- Malzeme yapısını atomik boyutlarda kontrol edebilme,
- Kızılaltı ve morötesi radyasyonlara tepkisi kontrol edilebilir malzeme ve özel amaca yönelik aygıt geliştirme yöntemleridir (1).

Bilgisayar çağının başları olan 1950 'lerden bu yana yaklaşık her 18 ayda bir bilgisayar performansının iki katına çıktığı ve büyüklüğünün yarıya indiği bilinmektedir (Moore kuralı (1). Şekil 2.1.(a) ve 2.1.(b)'de gösterilen grafik Moore'un öngördüğü gibi yıllara göre bir bilgisayarda kullanılacak transistör sayısını ve bu transistörler deki küçülmeyi

göstermektedir. Bu kural 2020 'li yıllara kadar geçerliliğini koruyacak; bu yıllarda, üretilen bilgisayarlar moleküler boyutlara kadar gelip dayanacaktır. Bu şekilde bilgi işleme hızı oldukça artarken enerji kullanımı çok az indirilebilecektir.



(a)



(b)

Şekil 2.1. Moore Kanununa göre bilgisayarlarda kullanılacak transistör sayısı ve minyatürizasyonu (a) küçülme oranı, (b) transistör gelişimi

2.2. Bilgi İşleme ve Bilgi Saklama Cihazları

Bir yarıiletken olan Si kristalinin tümleşik devre üretiminde kullanılması mikro elektronik teknolojisinde çığır açan gelişmelere yol açmıştır. Bu süreç 1940' lardan başlayıp günümüzde milyonlarca elektronik aygıtı barındıran karmaşık işlemcilerin aynı yonga üzerine üretilebildiği üretim düzeyine ulaşmıştır.

Boyutların küçülmesi ve nano metre boyutlarına inmesi nedeni ile nano elektronik aygıtların, önemli oranda silikon yarıiletken malzemelerin yerini alması beklenmektedir. Nano metre boyutlarında oluşan kuantum etkilerini temel alan tek-elektron transistörler, tünel diyotlar ile moleküler elektronik aygıtlar, bu yeni teknolojinin yapı taşlarını oluşturacaktır. Bu aygıtların oluşturduğu, moleküler ve tek-elektron seviyesinde sayısal işlemlerin yapıldığı, trilyonlarca aygıtın bir araya geldiği geleceğin yüksek performanslı sayısal tümleşik nano elektronik devrelerin, son 40 yıldır devam eden Moore yasasını (1) 2020 ve daha sonrasına taşıması beklenmektedir.

Nano elektroniğin sayısal devrelerin gelişimine yapması beklenen katkının bir benzerini, nano fotonik aygıtların da optik iletişim ve internet teknolojilerine yapması beklenmektedir. Günümüzde optik fiber teknolojisinin sunduğu kapasitenin yalnızca binde biri kullanılmaktadır. Bu kapasitenin kullanımı lazer dedektör ve modülatör gibi fotonik aygıtların kapasitesi ile sınırlı kalmaktadır. Nano fabrikasyon teknolojileri kullanılarak yaratılacak nano detektör, nano lazer ve nano modülatör aygıtlarının kullanıma girmesi ile daha yüksek hızlarda çalışan optik iletişim sistemleri, 2020 yılı ve sonrasında ihtiyaç duyulacak iletişim kapasitesini karşılayacaktır.

Nano fotonik yapılar ve fotonik kristaller kullanarak madde ile elektromanyetik dalgaların etkileşmesini kontrol altına almak mümkündür. Bu etkileşimi moleküler seviyeye taşıyarak tek molekül ile nanoteknolojiler kullanarak etkileşmek mümkün olacaktır. Bu etkileşim ise tek molekül hassasiyetinde sensör yapılmasını sağlayacaktır. Bu tür bir aygıtın özellikle moleküler biyoloji ve nano tıp bilimlerinde önemli uygulamaları olacaktır. Biyoteknoloji uygulamalarının yanında moleküler bilgisayarların "giriş-çıkış" sorunlarını da nano fotonik teknolojileri kullanarak çözmek mümkün olacaktır.

Silikon ve diğer bir IV. grup yarıiletkeni germanyum, sahip oldukları indirekt bant aralığı nedeni ile etkili ışıma gösteremediklerinden fotonik uygulamalar için uygun değildir. Ancak son yıllarda, poroz ya da nano kristal biçimindeki küçük boyutlu Silisyum ve Germanyum yapıların ışıma yaptığı gözlemlenmiştir. Bu buluş, Silisyum

tabanlı fotonik aygıtların mikroelektronik devrelerle tümleşik olarak üretilmesinin yolunu açmaktadır. Nano kristaller, görünür bölgede rengi boyutlarına bağlı olarak değişen ışık yayabilen etkili merkezler oluşturmaktadır. Görünür bölgede ışıma yapan yarıiletken nano kristaller elektroniğin dışında da uygulama alanları bulmaktadır. II-VI grubu bileşik yarıiletkenlerinden (CdS, CdSe, CdTe) oluşan nano kristaller boyutlarına bağlı olarak farklı renklerde ışıma yapabilmektedir ve bu özellik canlı hücrelerin işaretlenmesinde, tanı amaçlı olarak kullanılmaktadır.

Günümüzde sabit disklerde dev manyetik rezonans (GMR, Giant Magnetic Resonance) etkisi kullanılmaktadır. Ama sabit disklerde kullanılan boyutların 100 nanometre seviyesine yaklaşması ile bu teknolojinin kullanımı pratik hale gelmeyecektir. 100 nanometreden daha küçük boyutlarda manyetizma etkisi elde edilmesini amaçlayan nanomanyetizma teknolojilerinin bu aşamada devreye girmesi beklenmektedir. Spintronik olarak da adlandırılan bu teknolojiler vasıtası ile tek atom spin seviyesinde sayısal bilgileri bu malzemelere yazmak ve okumak mümkün olacaktır (1). Atomik seviyede bilgi saklayabilme teknolojileri ile 2020 yılına kadar ve daha sonrasında ihtiyaç duyulacak bilgi saklama ihtiyaçları karşılanmış olacaktır.

2.3. Nano Ölçekli Malzemeler

Önümüzdeki 20 yıl içerisinde nano malzemeler ile ilgili bilimsel, teknik ve mühendislik çalışmalarından beklentiler, klasik malzemelerin özelliklerinin ve uygulamalarının gelişmesine, yeni teknoloji alanlarının ortaya çıkmasına neden olacak niteliktedir. Nano malzemeler, metal, seramik, organik moleküler topluluk, polimerik ya da kompozit malzemeler olabilir. Boyutlarının 1 ile 100 nm arasında olması en önemli tanımlayıcı nitelikleridir. Nano malzemeler, yalnızca minyatürizasyonda yeni bir aşama olarak düşünülmemelidir; tamamı ile yeni bir alan olduğunu görmek daha doğru olacaktır. Nano dünya, atomik ve kuantum fenomenleri ile hacimsel (bulk) malzeme ölçeğinin arasında yer almaktadır. Geleceğin teknolojilerinin atom, molekül ve nano küme boyutlarında, malzemenin şeklinin kontrol edilmesi, nano yapıların organize edilmesi, aygıtlara dönüştürülmesi, malzemenin ve yüzeylerin tasarlanması-işlenmesi üzerine inşa

edileceği öngörölmektedir.

Polimerik malzeme teknolojileri; tüketim plastikleri olarak bilinen ve yaygın olarak 1930’lu yıllardan beri kullanılan polietilen, polistiren ve polivinil klorür (PVC) kullanılmaktadır. Bu malzemelerin yanı sıra "Mühendislik Plastikleri" olarak tanımlanan asetaller (polioksimetilen), ABS (akrilonitril-butadien-stiren), polikarbonatlar, polifenilen eterler ve oksitler, poliamidler, termoplastik poliyesterler gibi malzemeler bulunmaktadır. Ayrıca polipropilen gibi plastikler de elektronik, ısı, medikal ve kimyasal ortamlardaki yüksek teknoloji uygulamalarında kullanılmaktadır.

Kompozit malzeme teknolojileri; en tipik örnek, artık günümüzde gelenekselleşmeye başlayan ve "fiberglas" olarak bilinen polyester esaslı reçinelerin cam elyaf ile takviyesiyle üretilen malzemelerdir. Ancak bugün ileri kompozitler grubunda daha üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip elyaflar kullanılmaktadır. Bu malzemeler yüksek dayanım (çekme ve basma dayanımı), yüksek elastik modül ve yüksek tokluğa sahiptirler.

Akıllı malzeme teknolojileri; “Akıllı malzemeleri” kısaca şu şekilde tanımlamak mümkün: kendi içinde ve çevresindeki değişimlere tepki vererek belirli işlevleri anında ve sürekli olarak yerine getirebilen malzemeler, olarak değerlendirilmektedir. Akıllı malzemelerde yapılabilecek bazı uygulama örnekleri aşağıda verilmiştir:

- “Akıllı” bir malzeme ile yapılan uçak kanatları, herhangi bir çatlak veya hasar anında renk değiştirerek uyarıda bulunmalı ve hatta bu hasarı tamir ve “tedavi” edebilmelidir.
- Otomobil camı, çok parlak güneşli havalarda koyulaşarak ve bulutlu havalarda ise daha berraklaşarak sürücünün görüşüne destek olmalıdır.
- “Akıllı” tuğla ya da yapı taşlarından inşa edilmiş bir evde ısı yalıtımı, dışarısının iklim koşullarına göre değişerek azami enerji tasarrufunu sağlayabilmelidir.

- “Zeki” yapılarda kullanılan bir diğer akıllı malzeme ise “şekil-hafızalı alaşımları”dır. Çoğunlukla nikel-titanyum alaşımlarından oluşan bu malzemeler, kristal yapılarında martensitik fazdan östenitik faza dönüşümlerin etkisi ile “önceki şeklini hatırlayabilen ve ısıtıldığı zaman önceki şekline tekrar dönebilen” bir özelliğe sahiptir. Bu malzemelerde “önceki şekline” dönme sürecinde engelleyiciler konursa 700 MPa’ya varan yüksek gerilimler oluşur ve malzeme adeta “kas gibi” hareket etmeye başlar ve bu özelliğiyle biyomedikal uygulamalarda kullanılabilir. Hafızalı alaşımlar, medikal uygulamaların yanı sıra, uçak hidrolik sistemlerinde, yarıiletken gaz tüp bağlantılarında, diş düzeltme komponentlerinde, otomotivde radyatör pervanelerinde, egzoz çıkış kontrollerinde, uydu sistemlerinde, termostatik cihazlarda kullanılmaktadır.
- Teknolojik uygulamalar için çoğu zaman malzemenin kendisinin “akıllı” özelliklere sahip olması yeterli olmayabilir. Bu tip malzemelerin kullanıldıkları sistemin kendisinin de “zeki yapı” niteliklerine sahip olması gerekir. “Zeki” bir yapı içerisinde “akıllı” malzeme, algılayıcılar (sensör), sinyal süreçleri (algılayıcılardan ulaşan bilgiye dayalı karar verebilmek için) ve başlatıcı mekanizmalardan (yapının tepki göstermesini başlatan) oluşan bir ağ içerisinde işlev görür. Ancak bu şekilde, kompleks ve sistem olarak “zeki” ya da “akıllı” yapı oluşur (7).
- Manyetik, elektronik, opto-elektronik malzeme teknolojiler; Bunların en önde gelen örnekleri sensörler ve MEMS (mikro elektronik mekanik sistemler) gibi uygulamalarda görülmektedir. Bu malzemelerde en önemli gelişim Nd-Fe-B (neodimyum-demir-bor) magnetlerinin daha üstün manyetik özellikleri ve düşük maliyetleriyle, SmCo (samaritum-kobalt) ve AlNiCo (alüminyum-nikel-kobalt) malzemelerin yerini almasıyla gerçekleşmiştir. Diğer yandan seramik feritler halen büyük bir pazar payına sahiptir (7).
- Elektronik ve fotonik malzemeler bilgi ve iletişim teknolojilerinde giderek artan işlevsellikte yer almaktadır. Mikroelektronik, nanoelektronik ve telekominükasyon sistemlerinde elektrik sinyallerin üretilmesi, iletilmesi,

kontrol edilmesi, yükseltilmesi ve anahtarlanması gibi tüm işlemlerde bu malzemeler kullanılmaktadır.

Silika esaslı optik kablo teknolojisi, lazer teknolojisi, ultra-hızda işlem yapan devreler, iletken ve yarıiletkenler, optik sensörler, fotovoltaikler¹, sıvı kristal teknolojisi bu alanların başında gelmektedir. Bu yüzyılda en önemli gelişmeler bu saydığımız alanların “nanoteknolojik” uygulamaları ile gerçekleşecektir.

Nano malzemeler boyutlarından dolayı, elektronik, fotonik, manyetik, reolojik (Reoloji, maddelerin belli bir andaki gerilimlerini biçim değiştirmelerine bağlayan madde davranış yasaları bilimidir.), yapısal ve mekanik niteliklerinde olumlu yönde farklılık gösterirler. Bu farklılığın nedenleri ise, yüksek yüzey-hacim oranları, hacimsel davranışlar ortaya çıkmadan sınırlı sayıda atom ya da molekül arasındaki kooperatif fenomenler ve nano-boyutlu yapılarda ortaya çıkan kuantum etkileridir (7).

Metamalzeme teknolojileri; 1999 yılında Londra Imperial College’da çalışan Prof. Sir John Pendry tarafından kuramsal olarak ortaya atılmıştır. Daha sonra San Diego, Girit ve Bilkent Üniversitelerinde ortak olarak yapılan çalışmalarla bu malzemeler deneysel olarak da üretilmiştir. Metamalzemelerin en önemli özelliği, ışık özelliklerinin negatif olmasıdır. Örneğin, havadan gelen bir ışık demeti suya girerken belirli bir açıda kırılmaktadır. Oysa bu kırılım meta malzemelerde negatif yönde olur. Yani, bu malzemelerde ışığın kırılma indisi negatiftir. Faz hızı, ışık basıncı, Doppler etkisi, Cherenkov radyasyonu gibi optik özellikler de bu malzemelerde negatif olarak ortaya çıkar. Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi’nde yapılan çalışmalar sonucunda, dünyanın en küçük boyutlarına sahip negatif kırılma indisli metamalzemeler üretilmiş bulunmaktadır. Günümüzde entegre devrelerin minimum boyutlarını sınırlayan en önemli faktör, bu devreleri yapmak için kullanılan merceklein optik çözünürlüklerinin yetersiz kalmasıdır. Oysa nanoboyutlarda sahip nanometamalzemeler kullanarak, geleneksel merceklein çok daha yüksek

¹ Fotovoltaik, (photovoltaic) terimi, ışıktan gerilim üretilmesi anlamına gelir ve genellikle “PV” ile gösterilir. Fotovoltaik piller için kullanılan ortak terim “Güneş Pilleri” olmakla birlikte, piller her tür ışık altında elektrik üretebilirler.

malzemelerin değişik özelliklerini değişik hassasiyetlerde ölçebilen yöntemler vardır. Bu mikroskoplar vakumda, yüksek basınç altında, sıvıda, havada, düşük ve yüksek sıcaklıklarda bile çalışabilmektedir.

Bu yöntemin olumlu yönleri; atomik seviyede görüntü vermelerinin yanında, atomik seviyede bile fabrikasyon işlemlerine olanak tanınmasıdır. Bu mikroskoplar gen manipölasyonundan, atomik transistörlere kadar geniş bir yelpazede geniş fırsatlar sunmaktadır. Henüz başarılammakla beraber yüzeydeki atomların hangi elementlerden oluştuğunu da AKM ile ölçme işlemi de yakın gelecekte mümkün olabilecektir.

Olumsuz yanları ise AKM henüz sıvıda atomik çözünürlükle çalışmamaktadırlar. Bu mikroskobun sıvı içinde atomik çözünürlükle çalıştırılabilmesi, nano biyoteknoloji ve diğer nano bilim alanlarında büyük bir devrim yaratacaktır.

Nano ölçekli malzemelerin görüntülenmesinde geline son noktası ise 1–5 nm seviyesinde SPM litografi geçtiğimiz yıllarda laboratuvar şartlarında gösterilmiştir. Bu yöntemin geliştirilerek elektron demet litografisine bir alternatif olması da incelenmektedir (1).

2.5. Nano Ölçekli Malzemelerin Fabrikasyonu

Daha öncede ifade edildiği gibi nanoteknoloji adı verilen tüm teknolojilerde kullanılan boyutlar 100 nm ve daha altındadır. Geleneksel silikon teknolojisinde kullanılan optik litografi yöntemleri bu boyutlarının içeren aygıtların üretiminde yetersiz kalacağı öngörülmektedir (1). Bu durumda nano yapıları üretmek için yeni fabrikasyon teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Optik litografi temelli silikon teknolojisi 10–15 yıl içerisinde yetersiz kalacaktır. Bunun yerine nano yapılar içeren nano elektronik temelli tümleşik entegre devrelerin yapımında elektron demet nano litografi sistemleri kullanılacaktır. Elektron demet litografisi yöntemi günümüzde nano yapıların üretiminde en yaygın olarak kullanılan teknolojidir ve ileride hızla gelişmesi beklenmektedir. Elektron dalga boyunun 0.1-1 nm

mertebesinde olması sayesinde elektron demetlerini 1 nm boyutlarında odaklamak teorik olarak mümkündür. Bu şekilde odaklanmış elektron demeti ile uygun fotorezist malzemeleri kullanarak nano yapılar yapmak mümkün olmaktadır. Elektron demet nanolitografi sistemleri tüm nanoteknolojilerde önemli bir temel teknoloji olacaktır.

Elektron demet nano litografi teknolojisi, aynı anda tek bir noktayı yazması nedeni ile tümleşik devre yapma konusunda hızı yetersiz kalmaktadır. Bu duruma çare olarak paralel olarak çalışan birçok elektron demetinin kullanılması öngörülmektedir. Elektron demet litografisinin yavaşlığına çözüm olarak nano baskı teknolojisi önemli bir hız avantajına sahip olacaktır.

Bu teknolojiye master denilen ve elektron demet litografisi ve reaktif aşındırma yöntemleri ile oluşturulan bir mekanik maske kullanılacaktır. Bu master daha sonra polimer bir yüzeye bastırılmak yöntemi ile master maskede yazılı bulunan tüm ayrıntılar kopya edilecektir. Bu şekilde master maske üzerinde bulunan bütün nano yapılar hızlı bir şekilde kopyalanacak ve tümleşik devre yapımı çok hızlanmış olacaktır.

Bu nano fabrikasyon teknolojileri ile nano yapılara sahip robotlar veya nano robotlar yapmak mümkündür. Nano robotlar belirli bir işlemi veya işlemleri çok hassas olarak tekrar edebilen nano makinelerdir. Daha büyük boyutlarda olan robotlar gibi nano robotlar da ikiye ayrılabilir: Bağımsız ve böcek nanorobotlar. Bağımsız nanorobotların üzerinde kendi nanobilgisayarları olduğu için kendi başına hareket etme özelliği vardır. Böcek nanorobot ise merkezi bir bilgisayar tarafından kontrol edilen bir nano robot sürüsünün tek bir elemanıdır. Nano robotların özellikle tıpta önemli uygulamaları olacaktır. Örneğin kendini yenileyebilen bir grup böcek nano robot bir hastalığın aşısı olarak davranabilir. Hastalığı oluşturan mikroorganizmaları tanıyıp yok etmek ile görevli bu nano robotlar ile daha önce tedavisi olmayan hastalıklara çözüm bulunması beklenmektedir (1).

2.6. Nano Ölçekte Kuantum Bilgi İşleme

Aygıt boyutlarının çok küçülüp nano metre boyutlarına inmesi, bilgi işleme de yeni bir anlayışı beraberinde getirmektedir. Bu aşamada kuantum bilgi işleme yöntemleri geliştirilecek ve kuantum bilgisayarların devreye girmesi söz konusu olacaktır. Kuantum bilgi işlemede erişilebilecek çok yüksek hızlar sayesinde karşılaşılabilecek birçok karmaşık problemin çözümü mümkün olabilecek, bilim ve teknolojinin daha hızlı gelişmesi için ortam hazırlanacaktır.

Onaltı bitlik işlem kapasitesi olan bir kuantum bilgisayar, normal bilgisayarlar ile hesaplanması 300 yıl sürebilecek bir karmaşık hesaba bir ayda tamamlayabilecektir. Kuantum bilgi işleme ile DNA molekülünün sırlarının atomal seviyede çözülmesi (örneğin genom projesi) ve canlının temel yapısının kısa sürede anlaşılması insanlığın önüne daha sorunsuz bir yaşam için sınırsız olanaklar sunabilecektir (1).

2.7. Nano Bilim ve Biyoteknoloji

Modern bilim biyolojik olaylara (yaşama) moleküler düzeyde bakmakta, özellikle çok hızlı ve çok sayıda paralel ve/veya ardı ardına devam eden biyolojik reaksiyonları anlamaya çalışmaktadır. Buradan alınan bilgiler ile esas olarak yaşam kalitesini artıracak teknolojik gelişmeler sağlamaya çalışılmaktadır.

Yaşamla ilgili tüm bilgi DNA'dadır. Bu bilgi farklı şekillerde ürünlere (proteinlere başta olmak üzere çeşitli biyolojik moleküller) dönüştürülmektedir. DNA da zamanla gelebilecek değişiklikler (mutasyon), yanlış ürün (biyolojik molekül) üretimi nedeniyle biyolojik fonksiyonların bozulmasına ve dolayısıyla çeşitli ve çok önemli hastalıklara yol açabilir.

Genetik değişikliklerin ve oluşan biyolojik moleküllerin izlenmesi ile oluşan veya oluşacak hastalıkların izlenmesi, erken tanı ve hastalıkların başlangıçta müdahale ile etkin tedavisinde çok önemlidir. Şüphesiz bu analizlerin doğru/hızlı olarak yapılması

birçok bilinmeyen de çözümü demektir ki bu hastalıktan korunmayı hem de doğru tedaviyi sağlar. Biyolojik moleküllerin tanısında kullanılabilecek en duyarlı ve spesifik yaklaşım, tanıyıcı olarak bu moleküllerin eşleniklerinin (örneğin DNA tek sarmalının eşleniği oligonükleotid, proteinin karşıtı antibadi molekülü, vb.) kullanıldığı biyoafinite sistemlerinin (tanı kitleri, biyoçipler, biyosensörler, vb.) uygulanmasıdır (1).

Yalnızca fonksiyon bozukluklarının izlenmesi/tanısı şüphesiz yeterli değildir, hastalığın tedavisi gerekir. Bunun için çeşitli ilaçlar kullanılmaktadır. Yeni eğilim özellikle birçok biyolojik reaksiyonu durduran veya istenilen yönde gitmesini sağlayacak biyolojik moleküllerin (özellikle antibadiler ve diğer proteinler, antisense özellikte oligonükleotidler) ilaç olarak kullanımıdır. Bu moleküllerin teknolojik boyutta çok saf ve ekonomik olarak üretimleri gerekir. Genetik bozukluklara dayanan hastalıkların tedavisinde en doğru çözümlerden biri de eksik veya yanlış çalışan genetik bilginin düzeltilmesidir, bunun için özellikle son yıllarda uygulanmaya başlanan gen tedavisinin geleceğin en önemli tedavi yöntemi olacağı düşünülmektedir. Genetik bilginin (DNA parçalarının) doğru olarak tanımı, saf olarak üretimi ve doğru olarak aktarılması gerekir.

Sonuç olarak; biyolojik olayları kontrol eden biyolojik moleküllerin (başta proteinler olmak üzere) varlıklarının, fonksiyonlarının ve aralarındaki ilişkilerin tanımlanması gelişmiş moleküler analiz yöntemleri gerektirir. Bugün yeteri kadar hızlı, çok sayıda örneği aynı anda değerlendiren, çok düşük konsantrasyonlarda ölçüm olanağı veren cihazlar bulunmamaktadır. Biyoçip teknolojisi bu yönde geliştirilen en önemli teknoloji olarak gözüксе de henüz istenilen ölçümleri yaygın kullanıma olanak verecek şekilde çözümden çok uzaktır (1). Gelecekte mutlaka moleküler düzeyde ölçüm yapan, nanoteknolojinin şimdilik çoğu bilinmeyen veya ürüne dönüştürülemeyen avantajlarını kullanan yeni yaklaşımlara gereksinim olacaktır.

3. NANOELEKTRONİK CİHAZLAR KONUSUNA GENEL BİR BAKIŞ

Nano elektronik cihazlar kullanılarak yapılmak istenenler; nanoelektronik anahtarlama cihazlarını içeren, düşük güç hesabı yapan yapıları oluşturmaktır. Bunun için fabrikasyon tekniklerinin ve mimari kavramların büyük ölçüde oluşturulması gerekmektedir (8). Burada fabrikasyon teknikleri ve mimari kavramlarına kısaca değinilecektir.

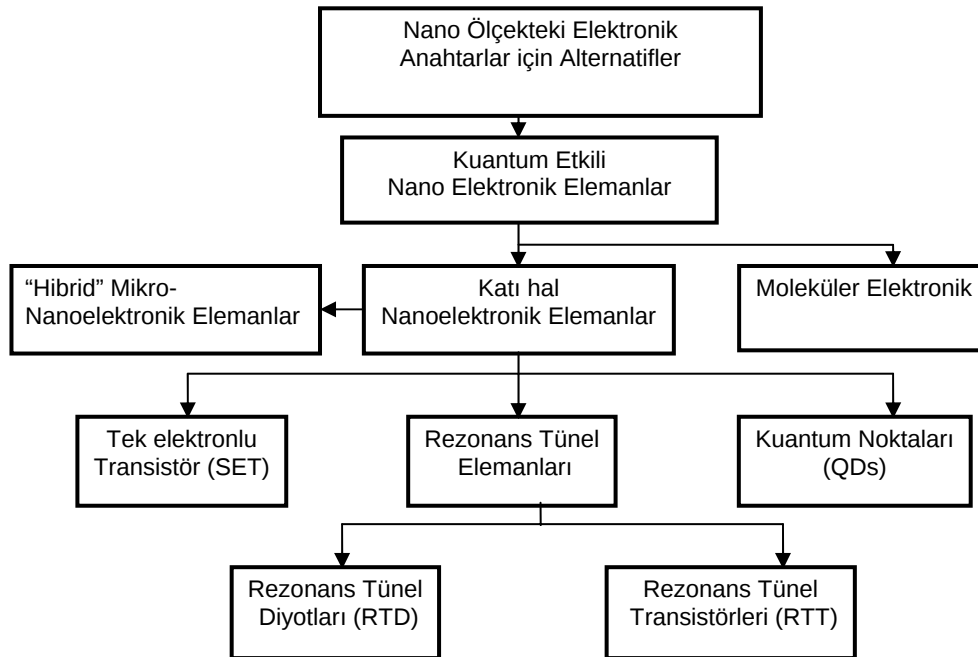
3.1. Katı-Hal Kuantum Etkili Nanoelektronik Cihazlar

Katı-hal kuantum etkili nano elektronik cihazlar, bilgi işlemede yoğunluk ve hızda yakalanan gelişmeleri artırmaya devam etme konusuna alternatif olmaktadır. Bu teknolojiye işlem prensibi değişip ama entegre devreler için katı fabrikasyon aracını değişmemektedir. Alan-etkili transistör alanını 25 nm uzunluğa kadar indirerek cihaz üretimini minimize edecek Moore's Law elektronik minimizasyonunu sağlayabilmektedir. Ticari entegre devreler üzerindeki günümüz alan etkili transistörler (FET), 1 mikron veya 1000 nm'dir. Eğer Alan-etkili minimize edilmiş FET'ler in kapıları 25 nm'nin altına düşürülürse fonksiyonları duracaktır. Bu da cihazın uzunluğunun 100 nm olmasına karşılık gelmektedir. Kuantum etkili anahtarlama cihazları ise daha küçük yapıldıklarında fonksiyonları daha iyiye gitmektedir. Katı-durum kuantum etkili nanoelektronik cihazlar yaklaşık 12 ila 25 nm arasında mümkün olduğu kadar küçük yapılabilirler. Eğer bu ölçeklerde güvenilir ve düzenli yapılabilirlerse, etkili bir şekilde fonksiyonları devam ettirebilir (8).

Bununla birlikte, katı-hal nano elektronik anahtarlama cihazları fabrikasyon edilmekte ve kullanılmaktadır. Ayrıca prototip (laboratuar koşullarında yapılan) katı-hal işlemcileri şimdiden kullanıma hazırdır (9,10). Boyuttaki bu keskin azalma sonucunda, entegre devrelerde bir tek CPU çipi üzerinde 100 milyar hatta 1 trilyon anahtarlama cihazları ile ultra hızlı, düşük güçlü, bir çip elde edilebilir. Bu çip, üzerindeki Terabayt “non-volatile” belleklerinde olduğu gibi, bu gibi nano elektronik cihazların üretilmesi sonucu sağlanabilecektir (8).

Bu gibi büyük ilerlemeler aynı zamanda güvenilir ve düzenli olarak sadece 5 ila 10 nano metre arasındaki değerlerde kütlenin fabrikasyonunu gerektirir. Bu günümüzün endüstriyel metot seçeneği olan UV litografisinin kullanılarak en azından 25 defa küçültülmesiyle başarılabılır. Yakın zamandaki hedeflerde bu tip uç doğruluklar istenmemektedir. Fakat katı-hal kuantum-etkili cihazların diğer arzu edilen özellikleri örneğin düşük güç tüketimi ve yüksek hız gibi çok arzu edilen avantajların gerçekleşmesi istenmektedir. 3 tip temel Katı-Hal Nano elektronik Cihaz kategorisi vardır:

- 1- Kuantum noktaları(QD, Quantum Dots),
- 2- Rezonant Tünel Cihazları,
- 3- Tek Elektron transistörler (SET, single electron transistors).



Şekil 3.1 Nano elektronik elemanların sınıflandırılması

Kuantum etkisi için gerekli yapısal özellikli elektronlardan oluşabilen yarıiletken veya metalden meydana gelmiş küçük bir “ada (island)”, katı-hal nanoelektronik cihazlarda ortaktır. Nano elektronik cihazlardaki bu adanın, benzer bir mikro

elektronik alan etkili transistör kapısı ‘açık’ durumu olduğu zaman ki duruma benzer bir rol oynadığı varsayılmaktadır. Bu kompozisyonu, şekli ve adanın boyutlarında kendi ayırt edici özellikleri olan, değişik tiplerde ki katı-hal nanoelektronik cihazlar verir. Bu faktörleri kontrol etmek, adanın başından sonuna farklı yollardaki elektron geçişini kontrol etmede ki kuantum etkilerini kullanmayı gerektirir (8).

Bu bölümde Rezonans Tünel cihazlarından bahsederek Kuantum noktaları (QD, Quantum Dots) ve Tek Elektron transistörlere (SET, single electron transistors) daha sonraki bölümümüzde değinilecektir.

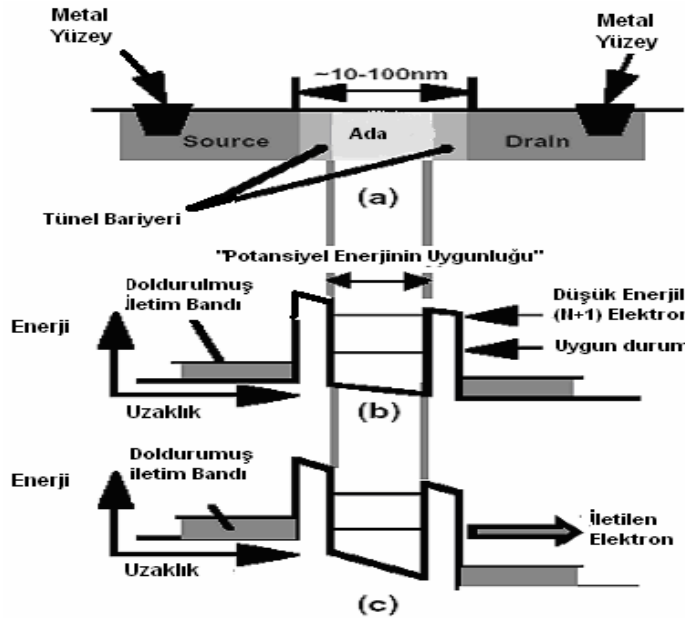
3.1.1. Rezonans tünel cihazları

Bu cihazlar genellikle bir çift GaAs ve AIAs gibi, iki farklı III/V yarı iletken metal alaşımı tabakasından üretilmektedirler. Rezonant Tünel Cihazlarının en basit tipi rezonans tünel diyotudur (RTD, resonant tunneling diode).

Rezonans Tünel Diyotların çalışmasının temel prensibi; Şekil 3.2 (a)’ da gösterildiği gibi bir rezonans tünel diyot, bir yarıiletken içerisinde yer alan iki bariyerden yapılmıştır. Bu bariyerler arasında bir ada veya elektronların olduğu potansiyel kaynaktan meydana gelir. Rezonans tünel diyotlar yaklaşık 10 nano metre genişliğindeki merkez adalarla yapılır. Ne zaman elektronlar bunun gibi iki kapalı boşluk arasında sınırlandırılırsa, kuantum mekaniği elektronların enerjisini sınırlandırmaktadır. Bu enerji kuantizasyonu çalışmanın temel prensibidir.

Elektronların cihazın içinden geçebilmesinin tek yolu kuantum mekaniği olarak iki bariyer arasındaki tüneldir. Elektronların tünel yapabilme olasılığı, cihaz adası üzerindeki enerji seviyelerine karşılık gelen elektronların enerjisine bağlıdır. Şekil 3.2 (b)’ de gösterildiği gibi, eğer gelen elektronların enerjisi ada üzerindeki potansiyel kaynak içindeki müsaade edilen enerji seviyelerinden farklıysa, akım geçmeyecektir. Cihaz ‘kapalı’ durumunda olacaktır. Bununla birlikte, gelen elektronların enerjisi iç enerji seviyelerinden biriyle aynı olduğunda, şekil 3.2 (c)’ de

olduğu gibi, kaynağın dışındaki elektronların enerjisiyle, kaynak içindeki elektronların enerjisinin rezonans olduğu söylenebilir. Akım cihazın içinden akar ve cihaz ‘açık’ durumunda olur (8).



Şekil 3.2. Katı- hal rezonans tünel diyotların çalışması

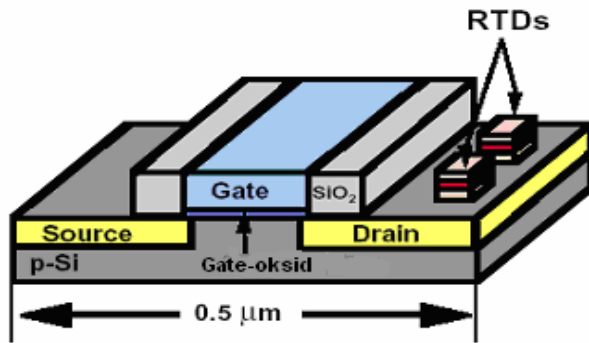
Bir RTD adası üzerine küçük bir elektrot kapısı eklenmesiyle çok daha kompleks rezonans tünel cihaz meydana gelebilir. Buna rezonans tünel transistör (RTT, resonant tunneling transistor) denir. Bu üç terminalli yapılandırmada, küçük bir kapı gerilimi, cihazdan akan büyük bir akımı kontrol edebilmektedir. Çünkü kapıya uygulanan çok küçük bir gerilim cihazdan akan oldukça büyük bir akıma ve voltaja neden olabilir. Yükseltme veya verim elde edilir. Bu nedenle, bir RTT tipik alan-etkili transistörler gibi hem anahtarlama hem de yükseltici gibi performans gösterebilir. Genellikle açık ve kapalı olmak üzere iki anahtarlama durumu olan tipik alan etkili transistörlerin aksine, RTD ve RTT gibi rezonant tunel cihazların farklı anahtarlama durumları olabilir. Bu da adadaki kuantum kaynağının farklı muhtemel enerji seviyeleri sergilemesinden dolayıdır (8).

Bir RTD üzerindeki eşik (bias) geriliminin sıfırdan arttırılmasıyla, ilk enerji seviyesi elektronlarla aynı rezonans seviyesine geldiğinde, “kapalı” olduğu durumdaki cihaz, “açık” durumuna geçecektir. Daha sonra, rezonansı geçtikten sonra eşik daha da

arttırılırsa tekrar anahtarlama “kapalı” durumuna gelecektir. Bununla beraber, kuantum kaynağında eğer ikinci bir enerji seviyesi varsa, RTD’ nin eşik geriliminin veya RTT’ nin kapı geriliminin daha da arttırılmasıyla cihaz tekrar “açık” durumuna gelecektir (8). Bu iki konumlu anahtarlama davranışı, her cihaza daha çok mantıksal durumlar sunmaktadır. Bu da birçok yeni mantıksal tasarım gerçekleştirilmesinde önemli bir kaynak olacaktır.

3.1.2. “Hibrit” mikro elektronik - nanoelektronik rezonans tünel transistörler

Nano metre ölçekli RTT’ lerin nispeten karmaşık yapıları, küçük boyutları ve çalışmalarındaki etki duyarlılığı nedeniyle çok miktarda ve yeterli düzenlilikte üretilmesi zordur. Bununla birlikte, katı-hal kuantum etkili cihazlarla, mikro-ölçek transistörlerin birleştirilmesiyle elde edilen “hibrit” nano elektronik cihazlar da vardır. Minicik yapılmış RTD - FET gibi bir hibrit transistör, alan -etkili mikro ölçekli FET’ in kaynağına, nanometre ölçekli kuantum etkili RTD’ nin uygulanmasıyla elde edilen bir cihazdır (8). Böyle bir cihazın şeması şekil 3.3’ te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Hibrit mikro – nano elektronik rezonans tünel transistörler

Bunun gibi bir hibrit RTT, daha önceki bölümde anlatılan yalnız nanometre ölçekli RTT’ ler gibi iki durumlu anahtarlama davranış tipi sergileyebilirler. Bu sebepten dolayı, hibrit bir cihaz, saf alan etkili ve entegre devreler üzerindeki aynı kılıflı mikroelettronik FET’lerden daha fazla mantıksal durumlar sunarlar. Bu nedenle, hibrit mikro elektronik RTT’ lerin iki durumlu anahtarlama karakteristikleri

kullanılarak, bir entegre devre üzerindeki cihazların yoğunluk artışı olmadan da mantığın yoğunluğu artırılabilir. Aynı zamanda, bu hibrit RTT' ler, yalnızca nano elektronik RTT' ler tarafından sergilenen düşük güç ve yüksek hız avantajlarını paylaşabilirler.

Hibrit tipi üç terminalli RTT gibi, nispeten büyük devrelerin fabrikasyonu, çok daha mini ve kompleks yapıdaki nanoelektronik RTT' lerin fabrikasyonundan daha kolaydır. Bu sebepten dolayı, bir takım gruplar bu cihazlarla deneyim yapmaktadırlar. Son birkaç ayda bu gibi hibrit cihazlar üzerine inşa edilmiş sağlam prototip devrelerin kullanımı ispatlanmış ve gösterilmiştir (9,10).

Hibrit mantığı nanoelektronik evrimi yolunda pratik mühendislik adına önemli bir basamak olarak görülebilir. Bu, entegre devrelerdeki kuantum etkili cihazların kullanılabilirliğini çok yoğun bir işlevlikle hızlandırabilir.

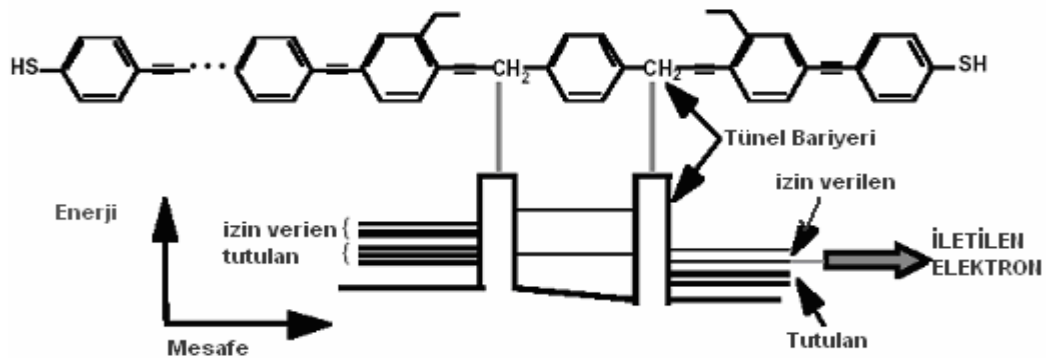
3.2. Moleküler Elektronik Cihazlar

Nano metre ölçeğindeki anahtarlama cihazları ve tellerden ultra-yoğunluklu düşük güçlü nano elektronik devreler yapılması istenmektedir. Moleküler elektronikte, teller ve anahtarlama cihazları gibi işlem görebilmesi için özel birleştirilen moleküller kullanılmıştır. Moore's Law'ın öngördüğü gibi, nano metre ölçeğine düşürmeyi ve yoğunluğu artırmayı gerçekleştirebilmek, uzun bir süreç gerektirecektir. Özel moleküler anahtarlama cihazları 1.5 nm kadar küçük olabilmesine karşın cihazların yoğunluğu yaklaşık cm^2 'de 10^{12} kadardır. Boyuttaki bu küçülme, bir çip üzerindeki Terabayt belleğini ve bir tek CPU çip üzerinde bir trilyon gibi aşırı bir anahtarlama cihazları sonucunu meydana getirebilmiştir.

Moleküler elektroninin öncelikli avantajı, moleküllerin çeşitli miktarlarda tamamen şu an kullanılan elektronik cihazların aynısını (yaklaşık aynı anda 10^{23}) yapılabilecek doğal nano metre ölçeğinde olmalarıdır. Geçen birkaç yıl boyunca görülmüştür ki; küçük organik moleküller, elektriği iletebilir ve kontrol edebilir (11,14). Aynı

zamanda büyük organik biyolojik moleküller de iletkendir. Yeni keşfedilen “buckminsterfullerens” olarak bilinen (“buckyballs” ve “buckytubes”) zayıf karbon moleküler şeklindeki özel moleküller, ilginç ve kullanışlı elektriksel özelliklere sahip olmaktadır (15,16).

Katı-durum RTD analog molekülü yukarıda anlatılmış ve şekil 3.4’ te gösterilmiştir. Bu moleküler RTD, Tour (12) tarafından üretilmiş ve Reed (13) adındaki bir grup tarafından kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Moleküler elektronik rezonans tünel diyodu

Özel organik moleküllerin elektriksel özelliklerinin anlaşılmasında ve kullanılmasında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Özel moleküllerin elektrik akımını teller gibi iletebileceği ve aynı zamanda bu akımı açık ve kapalı yaparak anahtar gibi davranabileceğini ispat konusunda özel deneyler yapılmıştır (11–14, 15–16). Bu moleküler anahtarlama cihazlarını kullanan mantık devreleri, henüz üretilmemiştir. Bununla beraber, bu gibi devrelerin dizaynı son zamanlarda düşünülmektedir (17,18).

Moleküler elektronik anahtarlama hakkındaki araştırma ve gelişmeler, benzer katı-durum cihazlardan daha küçük ölçekte olmaları dışında benzer özelliktedirler. Bu nedenle, moleküler elektronik anahtarlama önerilerinin ve prototiplerin, katı-durum diyot moleküler analogu ve katı-durum üç terminalli FET benzerleri ile aynı kategoride gösterilmektedir.

Şekil 3.4' te görülen moleküler yapıda, altıgen şeklindeki bileşenler benzen zinciri olarak bilinir. Bu zincirin halkaları, molekülün sağ ve sol sonunda görüldüğü gibi moleküler tel olarak iletken görevindedir. CH_2 grupları (metilen grup), başka bir ifadeyle, elektron akışına yalıtkan veya bariyer olarak davranış gösterir. Aralarında tek benzen halkasındaki elektronları tuzağa düşürürler ve burası ada şeklini alır. Ortadaki adada sandviçe benzer şekilde olan moleküler yapı, şekil 3.4' ün altında gösterilen taslaktaki gibi gerlim kaynağı şeklindedir. 10 kattan 100 kata kadar daha küçük olması dışında, şekil 3.4' te gösterilen moleküler potansiyel kaynak, şekil 3.2 (b)'de gösterilen katı durum RTD' yi andırır. Şekil 3.4' teki molekülün neden bir RTD gibi davrandığının sebebi bu benzerliktir.

3.3. Nanoelektronik Cihazlardaki Zorluklar

Nanoelektronik cihazların fabrikasyonu ve kullanımındaki son büyük gelişmelere rağmen, hala aşılması gerekli olan çok farklı zorluklar vardır (Ek-1). Nano elektronikler için gerekli olan nano metre ölçekli silikon karakteristikler ki bunlar: nano metre ölçekli adalar, bariyerler ve adalar ve bariyerler arasındaki “heterojunctions” (heterokoğunlukla galyum arsenit ve alimünyum arsenit gibi yarı iletkeavşaklar)’ dır. Bunların güvenli ve düzenli üretimini mümkün kılabilmek katı-hal nanoelektronik cihazlar için en önemli zorluklardan birisidir. Şimdiye kadar, katı-hal nano elektronik cihazlar çn bileşenlerden üretilmişlerdir (8).

Moleküler elektronikler için, en büyük zorluklardan biri, iki terminalli ve üç terminalli cihazları geliştirmek ve bunu devrelerle birleştirmektir. Daha sonra, son zamanlarda düşünüldüğü gibi bu gibi moleküler anahtarlama ile güvenilir bir mantık yapılabileceğinin ispat edilmesi gerekmektedir (9,10).

Katı-hal ve moleküler elektronik cihazlar kullanılarak yapılmak istenenler; nanoelektronik anahtarlama cihazlarını içeren, düşük güç hesabı yapan yapıları oluşturmaktır. Bunun için fabrikasyon tekniklerinin ve mimari kavramların büyük ölçüde oluşturulması gerekecektir (8).

4. MOLEKÜLER ELEKTRONİK CİHAZLAR

4.1. Moleküler Elektroniğin Gelişimi

Elektronik cihazların yapımında elemanların minyatürleştirilmesi, gelişen teknolojinin bir gereğidir. Bu cihazların boyutları, üstel bir oranda düşürülmeye devam etmektedir. Minyatürleştirme, daha hızlı mikroişlemcilerin ve ultra yoğunluklu entegre devrelerin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bununla beraber, geleneksel silikon tabanlı cihazların yapısındaki sınırlamaların, onların nano ölçeğe minyatürleşmesine imkan tanımayacağı ortaya konmuştur. Moleküller ve kimyasal sistemler ümit verici alternatiflerdir. Böyle bir senaryo 1959 yılında bir konferansta seçkin bir fizikçi olan Richard Feynman tarafından ileri sürülmüştür (3). Moleküllerin nano ölçekli cihazlar ve makinelerin yapımında temel eleman halinde yan yana kullanılabileceği fikri 1980'lerin ortasında süpramoleküler kimya üzerine yapılan bir araştırma çerçevesinde ortaya çıktı (5). Moleküler ölçekteki cihazlar alanındaki araştırmalar, süpramoleküler kimya konusunda ilgiyi arttırmıştır. Kimyasal reaksiyon mekanizmalarının özellikle de elektron transfer işlemlerinin anlaşılmasında büyük ilerlemeler olmuştur. Moleküler elektronik; yalın moleküller, küçük molekül grupları, karbon nanotüpler veya nano ölçekli metalik veya yarıiletken kablolar kullanarak elektronik fonksiyonları yerine getiren teknoloji şeklinde tarif edilebilir (19). Daha geniş bir tanımlamayla, moleküler özelliklerden faydalanan herhangi bir cihazın moleküler elektronik cihaz olduğu söylenebilir.

Her bir molekül veya özel bir grup molekülün durumunu kontrol edip onlara yararlı bir iş yaptırabilmek ve bu moleküllerin kendine özgü elektronik özelliklerini daha geniş ölçekli aygıtların yerine kullanmak, moleküler elektroniğin alanıdır. Bu alanın iki hedefi vardır. Birincisi, çok sayıdaki elektronik uygulamalar için moleküler seçenekler sunmaktır. İkincisi ise, yalın moleküler ölçekli sistemleri (örneğin molekül, süper molekül, molekül kümesi veya “demet-küme” gibi) optik, elektrik, manyetik, kimyasal veya biyolojik sinyalleri işleyen elektronik cihazlarda kullanabilmektir (5). Bu maddelerin en önemli özelliği, boyut ve özelliklerinin

sınırsız bir şekilde ayarlanabilme olanağıdır. Şu ana kadar Moore'un ünlü üstel gelişim kuralı başarılı bir şekilde izlenmiştir. Elektronik moleküllerin kullanımı ile ilgili şu anki çalışmalar, üç sınıfta gruplandırılabilir (Şekil 4.1) :

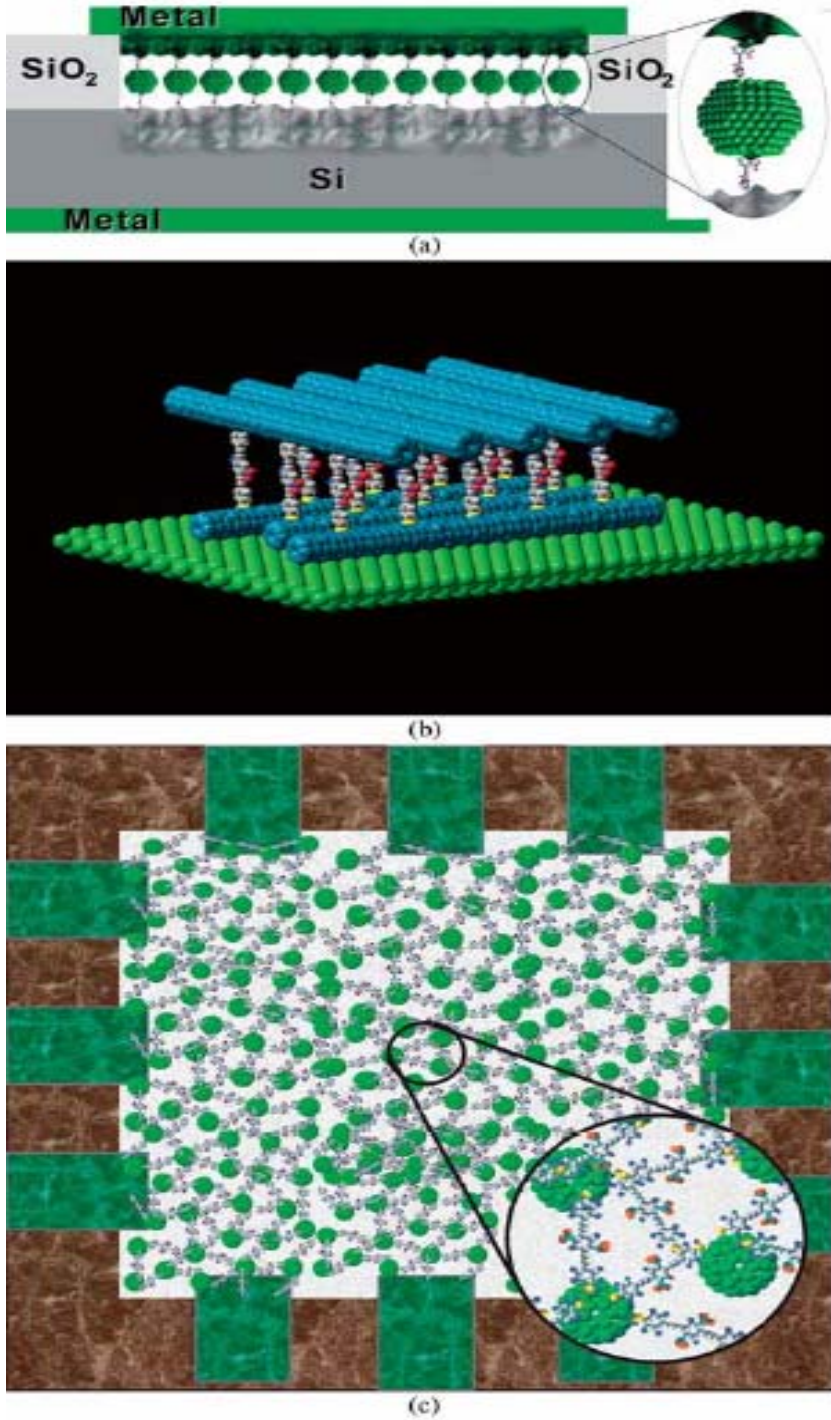
1) Yarıiletken cihaz özelliklerini ve moleküler destekli cihazları geliştirmek. Bunlar transdüserleri, LED'leri, sensörleri, güneş hücrelerini v.s. geliştirmeyi içermektedir.

2) Şu andaki yarıiletken cihazları ve sistemleri moleküler olanları ile değiştirmek. Bu sınıf, silikon elektroniği ile rekabet halindedir. Bu şekilde birkaç tane çapraz tel (crossbar) yaklaşımı (20–21) gibi tipik uygulamaları geliştirme aşamasındadır. Bunlar moleküler hafızaları ve mantık cihazlarını tasarlamayı mümkün kılar ve maliyetleri çok düşüktür.

3) Fotolitografi teknikleri ile sınırlanan ölçeklerde mikro elektronik cihazları tamamlamak. Moleküler devreler, moleküler tek-grup ve moleküler buhar birikintisi gibi yaklaşımlar kullanılarak imal edilebilirler. Örnek uygulama olarak programlanabilir moleküler cihazların, fotolitografi sınırları altında adreslenebilmesidir. Bu “nanohücre” (NanoCell) (Şekil 4.1.(c)) kavramı olarak adlandırılmaktadır (22). Moleküller eğer negatif türevsel direnç gibi yüksek derecede doğrusal olmayan I–V özelliklerde ise programlanabilirler (23).

Tek molekülü cihaz için molekülü tasarlarken, tasarlanan moleküllerin nasıl yerleştirileceğine ve nasıl ölçüleceğine karar verilmelidir. Ölçüm sırasında bir yüzey üzerindeki bireysel moleküllerin pozisyonlarının kontrolü zor olabilir. Bir metal elektrot üzerine bir molekülü koyarken iki seçenek mevcuttur: kimyasal soğurma veya fiziksel soğurma. Fiziksel soğurma; buhardan katı bir alt madde üzerine rasgele tortu bırakma veya hava-su ara yüzünden bir Langmuir–Blodgett (LB) tekil katmanı oluşturmaktır. Eğer transfer devam ettirilirse bir katı alt madde üzerine sıralanmış tekil katman transferi ile bir LB çoklu katman oluşumunu kapsamaktadır. Kimyasal soğurma ise tiol kovalent bağlarının oluşumunu, altın ve benzer metallerin bileşiklerini kapsamaktadır. Aynı zamanda hidroksil kaplanmış silikon yüzeyler

oluşumunu ve kendi kendine düzenlenen tekil katmanlar olarak adlandırılan (SAMs, self-assembled monolayers) oluşumları kapsar. Günümüze kadar moleküler



Şekil 4.1. Elektronik cihazlarda molekülleri kullanan üç ana sınıfın örnekleri.
 (a) Moleküler destekli FET. (b) Çapraz tel yaklaşımı (c) NanoHücre yaklaşımı

aygıtların büyük çoğunluğu, metal-tiol kendiliğinden düzenlenen tekil katmanlardır (SAMs) ve LB film tabanlıdır. Örnek olarak; altın veya gümüş üzerine kimyasal soğurma yapılan polipenil ve politiol molekülleri, altın ve titanyum arasında askıda bırakılan bipenil tiol ve alüminyum veya alüminyum oksit alt maddeler üzerindeki LB yapıları verilebilir. SAM ve LB, kimya tarafından oluşturulan moleküler birleşme noktaları, doğrultma, iletim, anahtarlama ve negatif diferansiyel direnç gibi ilginç elektronik etkiler sergilemişlerdir. Bunun örnekleri, redoks polimer filmlerindeki elektron transferi, iletken polimer filmlerin içerisine elektron enjekte edilmesi ve moleküler tünellemeli birleşme noktaları içerisine elektron enjekte edilmesidir.

Redoks polimer filmler, doğrultma ve kimyasal reaksiyonlar sırasında elektromanyetik radyasyon yayımı sergilemişlerdir. Bu davranışlar, redoks merkezleri arasında iyon hareketi eşliğinde veya iyon hareketi olmadan elektron transferi şeklinde açıklanmıştır. Grafitli alt madde ile organik tekil katman arasındaki karbon-karbon kovalent bağı, Au/tiol veya LB bağlarından daha güçlüdür. Bu sebeple, daha kararlı birleşme noktaları mümkün olabilir. Bu karbon/molekül/civa birleşme noktaları anahtarlama ve sıcaklığa bağımlılık sergilemektedirler. Bir moleküler cihazı ölçmek için STM ideal bir araçtır. STM ile atomik olarak düz fakat iletken bir alt madde seçilebilmektedir. İlgili molekül bu alt maddenin üzerine koyulabilir ve atomik hassasiyette ölçüm yapılabilir.

Moleküler elektronüğün en önemli hedefi, çok büyük yoğunlukta cihazları (örneğin moleküler kablolar, doğrultucular, opto-elektronik tetikleme anahtarları, transistörler ve bellekler gibi) meydana getirebilmek için moleküler düzeyde sentez, montaj ve minyatürleştirmeden yararlanabilme perspektifi ile ilgilidir. Bununla beraber moleküler elektronik cihazın nasıl bağlanabileceğini hesaba katmakta önemlidir. Bilgi alışverişi yapabilmeli, diğer moleküler cihazlara durumları transfer edebilmeli veya sistem içerisinde nanoskopik olmayan bileşenler arasında arabirim yapabilmelidir. Bu incelemenin amacı, moleküler cihaz ve moleküler maddelerin alt dalları hakkında bir altyapı sağlamaktır. Bu bölümde, moleküler doğrultucular, moleküler kablolar ve moleküler devreleri kapsayan veri işleme cihazları anlatılmaktadır. Bilgi saklama cihazlarını ve bu alandaki hızlı gelişmeden dolayı, bu

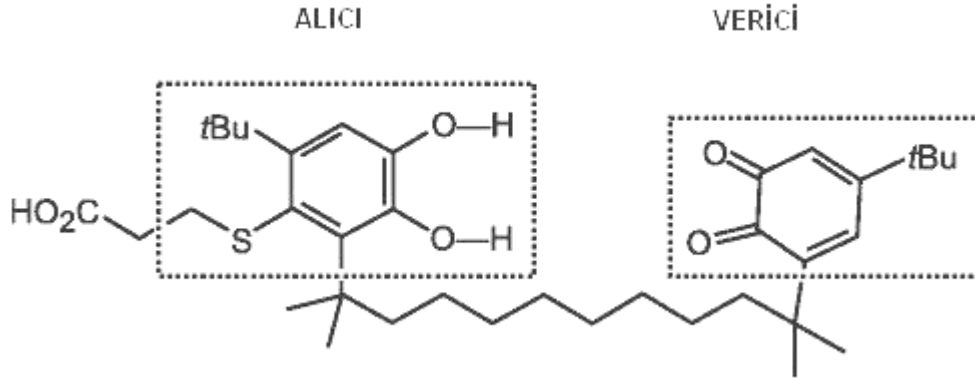
incelemeyi geniş kapsamlı olarak yapmak mümkün değildir. Bunun yerine, moleküler madde ve cihazlarla ilgili çalışmaya başlayan araştırmacılara bir destek olarak düşünülmelidir.

4.2. Veri İşleme Cihazları

4.2.1. Moleküler doğrultucular

Doğrultucu, sadece tek yönlü iletme izin veren temel bir aygıttır. Bir devrede, sadece geriliminin giriş kutupları değiştiğinde “açık” durumdan “kapalı” duruma bir değişim meydana gelir. En yaygın elektriksel doğrultucular, jonksiyonun (birleşme noktası) kullanılması temeline dayanır. Doğrultma, jonksiyon noktası ara yüzünde iki tür taşıyıcının difüzyonu ve sürüklenmesi şeklinde açıklanabilir. Moleküler elektronik ile ilgili ilk somut fikir Aviram ve Ratner tarafından ileri sürülmüştür. Bu fikir, tek molekül doğrultucu bir D- σ -A molekülünün. p-n jonksiyonunun organik bir benzeri şeklindeydi. Buradaki D, birinci iyonizasyon potansiyeli; düşük bir elektron vericidir (donör). σ ise bir miktar doymuş kovalent sigma (Sigma Bağı: İki atomun çekirdeklerini birleştiren doğrunun üzerinde bulunan ve ilk oluşan bağıdır.) köprüsü ve A da nispeten yüksek elektron ilgisi olan bir elektron alıcıdır. σ 'nın amacı verici yarım D' nin moleküler yörüngelerini, alıcı yarım A'nın moleküler yörüngesinden ayırmaktır. Aviram ve Ratner tarafından ileri sürülen ilk doğrultucu molekül doymuş σ köprüsü tarafından bağlanmıştır (24). İlk yıllar, nispeten daha düşük dipol momente sahip olan D- σ -A sistemleriyle ilgili çalışmalara harcandı ve tekil katmanlar için doğrultma ölçümüyle ilgili deney tekniklerinin eksikliği ile uğraşıldı. Geçen birkaç yılda daha yüksek bir dipol momente sahip olan D⁺- π -A- Zwitterion sisteminden iyi doğrultma sonuçları görüldü. Tekil moleküllerin doğrultma davranışları ilk olarak tarayıcı tünel teknikleri ile ölçüldü. Aviram ve çalışma arkadaşları ilk çabalarında, I-V karakteristikleri bir STM uç tarafından incelenen bir hemiquinone (Şekil 4.2) tekil katman kullandılar (25). Bu çalışmada, akım negatif eşikte daha etkili bir şekilde akmış fakat pozitif eşikte akmamıştır. Hemiquinone içerisindeki katekol yarım parçasının bir verici gibi davrandığı, quinone bileşeninin

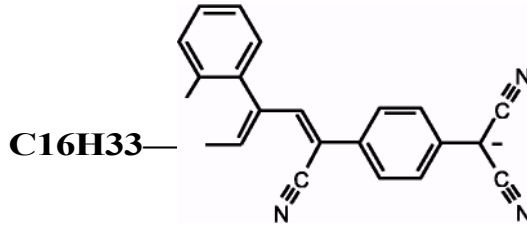
ise alıcı olduğu not edilmiştir.



Şekil 4.2. Hemiquinone'un kimyasal yapısı.

LB tekniği sıralı moleküler tabakalar üretmek için iyi düzenlenmiş bir tekniktir. Ashwell ve arkadaşları zwitterioic molekülü $C_{16}H_{33}$ - γ Q3CNQ'dan yapılan LB filmin doğrultucu özelliğini araştırmışlardır(26,27). Bu molekülün kimyasal özellikleri şekil 4.3' te gösterilmiştir. Aviram-Ratner moleküler σ köprüsünün aksine, bu molekül eşlenik sistemler (verici ve alıcı, sırasıyla, quinolinium ve tricyanoquinodimethanide parçalarıdır.) arasında bir π köprüsüne sahiptir. π elektronları arasındaki güçlü kublaj sayesinde toprak durumunda zaten bir yük transferi vardır. Bu yüzden, molekül sabit dipol momente sahiptir. Beş tekil katmandan oluşan LB film, bir cam alt madde üzerine gümüş alt elektrotlar ile magnezyum tabaka üst elektrotlar arasına yerleştirilmişlerdir. İlave gümüş tabakalar ve galyum-indiyum otektik damlacıklar yoluyla, magnezyum tabakalar altın kablolarla bağlanmışlardır. Bu olay, karmaşık kontak geometri akım/gerilim ölçümüne imkân vermektedir.

Doğrultma, zwitterion özelliği olan moleküllerin doğasıyla ilgilidir. Bu moleküllerin ayrıntılı rolleri Metzger ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmaya kadar açıklık kazanmış değildi (28). Toprak durumunun, zwitterion özelliği olan ve nötr olan moleküllerin karışımı olduğu ve molekül içi elektron transferinin doğrultmaya sebep olduğu ileri sürülmüştür. Metzger ve arkadaşları alüminyum kaplanmış quartz üzerine $C_{16}H_{33}$ - γ Q3CNQ LB filmleri yaptılar. Daha sonra film 77 kelvinde, üste buharlaştırılarak üste ikinci bir alüminyum tabaka eklediler. Metal yüzeylere bağlantılar Ga/In ötektik veya bir Ag macun ile yapıldı. Elektriksel ölçümler güçlü bir doğrultma özelliği gösterdi (28).



Şekil 4.3. C₁₆H₃₃-γQ3CNQ'un kimyasal yapısı

Son birkaç yılda moleküler elektronikte olan radikal değişmeler organik kimyacıları, uygun organik yapıları sentezlemesinde büyük imkânların kapılarını sağlamıştır. Bu organik yapılar nanoelektronik cihazların tasarımında potansiyel adaylar olarak görülmektedirler.

Benzen gibi aromatik moleküller elektronların kolayca akabileceği eşleniklere sahiptirler. Tipik olarak moleküler ölçekte doğrultucu özellikleri göstermesi için , bir molekülün kesin p-n bileşimli diyot özelliklerine sahip olması gerekir. P- tipi (alıcı) ve N – tipi (verici) moleküler alt üniteleri , benzen veya diğer simetrik aromatik moleküllere, elektron- çeken veya elektron-dolduran işlevsel gruplar ekleyerek elde etmek mümkündür. Böylece bir molekül doğrultucu, bu iki alıcı ve verici alt üniteler arasına iki elektrot birleştirilerek yapılabilir. Zaten elektronlar alıcıdan katoda veya vericiden anoda doğru akarlar (29).

Doğrultucu diyot veya transistör gibi aktif elemanlardan istenilen elektronik özellikleri elde etmek için elektron akımının kontrol edilmesi gerekir. Benzen moleküllere elektron çeken bir grup eklendiği durumda, benzen halkasındaki elektron yoğunluğu azaltılır. Hâlbuki elektron veren bir grup eklendiğinde elektron yoğunluğu artırılır. Teorik olarak elektron yoğunluğunun direk olarak o molekülün elektronik yapısını yansıttığını biliyoruz. Bu yüzden, molekül içinde elektron taşınmasını yönlendirmek için kesikli moleküler yörünge enerji seviyelerinin anlaşılması gereklidir. Verici konulmuş benzen durumunda daha fazla elektron – elektron itmesi olacağından HOMO ve LUMO durumlarının enerji seviyeleri yükselir. Hâlbuki alıcı konulmuş benzende ise elektron yoğunluğunun azalmasından dolayı HOMO ve LUMO durumlarının enerji seviyeleri azalır (29).

Ellenbogen' in makalesinde, birçok tekli değiştirilmiş ve ikili değiştirilmiş polipenil bileşikler, doğrultma işlem özelliklerini çalışmak için seçilmiştir (30). Boş yörüngelerin molekül boyunca elektronların iletimi için kanallar sağladığı kabul edilmiştir. Yalıtılıp değiştirilmiş benzen moleküllerinin en düşük boş enerji seviyeleri arasındaki fark, oşluk–alıcı) moleküler yapısı için potansiyel düşüş, alıcı vemolekül boyunca potansiyel düşüşün yaklaşık değerini tahmin etmektir. Bu şekilde birleşik molekülün, moleküler doğrultucu olarak etkinliğini ölçülebilmıştır. Fakat kimyasal bağlı D-S-A (verici–b verici taraflarında yerleşmiş boş yörüngeler arasındaki fark olarak ölçülür. Alıcı ve verici moleküller metilen ($-\text{CH}_2-$) ve dimetilen ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$) de olduğu gibi alifatik bir zincirle bağlıdır. Bu durum bir uçtan diğer uca elektron taşımamasını önlemek için potansiyel bariyer oluşturan bir ayıraç gibi davranır.

Sonuçta benzen halkasına bir veya iki NH_2 ve NO_2 fonksiyonel grupları eklenip değiştirilerek verici ve alıcı moleküler alt yapıları oluşturuldu. Metilen ve dimetilen alifatik grupları alıcı ve verici moleküller arasında ayıraç olarak kullanıldı. Bu moleküller arasındaki elektron aktarımı boş yörüngelerin (HOMO ve LUMO) uzaysal dağılımı temel alınarak incelendi. HOMO' lar her zaman verici tarafta yerleşirken, LUMO' ların alıcı tarafta yerleştiği gözlenmiştir. Ancak, LUMO durumunun verici tarafa yerleşmesi molekül içinde farklı potansiyel düşüşlerine sebep olan ayıraçlarının uzunluğuna ve katkı malzemelerinin sayısına bağlıdır. Tekli-değişmeli verici-alıcı yapılarında potansiyel düşüş, ayıracın metilen ve dimetilen olmasına göre 1.56 veya 2.05 eV' tur. Dimetilen grubu ile ayrılmış ikili-değişmeli verici-alıcı yapılarındaki potansiyel düşüşü 2.76' eV olarak bulunmuştur. İkili-değişmeli alıcı-verici yapıları tek-değişmeli alıcı-verici yapılarıyla kıyaslandığında potansiyel düşüşündeki %40' lık önemli artma değeri, bunun çok yaygın eşik voltaj değerleri için kullanılabileceğini gösterir (30).

4.2.2. Moleküler teller

Herhangi bir moleküler bileşeni kullanmak için gerekli olan ihtiyaçlardan bir tanesi,

onu cihaz yapısına bağlayabilmeye uygun hale getirebilmektir. Molekülleri birbirine veya makroskopik dünyaya bağlamak için, moleküler ölçekli teller gereklidir. Yapılan deneyler ile tek molekülün küçük elektrik akımlarını anahtarlayabileceği gösterilmiştir. Bu tek molekül kalınlığındaki yarıiletkenlerin bir nanometre karesinden, saniyede bir trilyon kadar elektron geçmektedir (31).

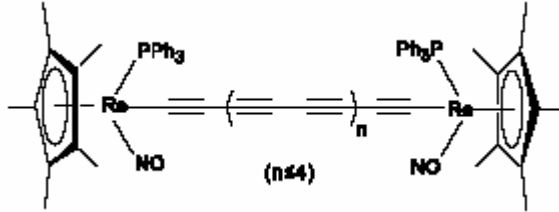
Moleküler kablolar böyle elektronik sistemlerin en basit bileşenleridir. Moleküler kablolarla örnek olarak; konjuge hidrokarbonlar, porfirin oligomerler, karbon nanotüpler ve DNA verilebilir. En önemlisi, devrede akımı taşımak için ileten elektron veya oyuk olmak zorunda olmalarıdır. Böylece, tel bir depodan diğerine elektron taşıma için bir patika yol sağlar ki bu da bir alan içerisinde elektron taşımaktan daha etkilidir. Bir telin özelliklerini ölçmede, genel olarak tel özelliklerini analiz etmede kullanılan tekniğe bağlı olarak değişik yollarla işe başlanır. Spektroskopik² teknikler kullanarak tel uçlarındaki elektron transfer oranı ölçümleri yapılmıştır. Yine telleri metalik veya yarı iletken şeklinde sınıflandırmak için ölçümler yapılmıştır. Ayrıca akım/gerilim karakteristiklerini elde etmek için STM gibi teknikler kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Değişen, tek, çift (veya üçlü) karbon-karbon bağları içeren konjuge moleküllerin elektronları, kendi π -sistemleri içerisinde iletirler. Bu pek çok telin temelini oluşturmaktadır. Tel aynı zamanda lineer olmalıdır. Devredeki iki bileşen arasındaki boşluğu kapamak için belirli bir uzunlukta olmalıdır (31).

En basit hidrokarbon moleküler tel, bütün atomları lineer olarak dizilmiş karbon zinciridir. Değişen tek ve üçlü bağlardan $R-(C=C)_n-R$ (burada R sonlandıran uç grubudur) oluşmuştur. 20 karbon atoma kadar uzunluktaki konjuge karbon zincirleri 2 chiral rhenium uç grupları ($\eta^5-C_5-Me_5$)Re(NO)(PPh₃), ile sentezlenmiştir. (Şekil 4.4) Metal grupların varlığı tellerin verimliliğinin test edilmesine izin vermektedir. Asetilen üniteleri tarafından bağlanmış aromatik halka³ zincirine sahip olmak da mümkündür. Halkalara iliştirilmiş grupları değiştirerek tellerin diğer özelliklerini

² Spektroskopi; atomun saldıgı ya da soğurduğu ışınım enerjileri gözlenerek ve incelenerek atomun yapısı hakkında bilgi edinme bilimidir.

³ Aromatik Yapı: hoş koku yayan hidrokarbon grubudur.

(örneğin belirli çözücülerde çözünebilirlik veya kabloyu belirli bir alt maddeye sabitlemek için bağlama grupları kullanımı gibi) değiştirmek mümkündür (32).



Şekil 4.4. Karbon zinciri tarafından köprülenen Rhenium metal merkezleri

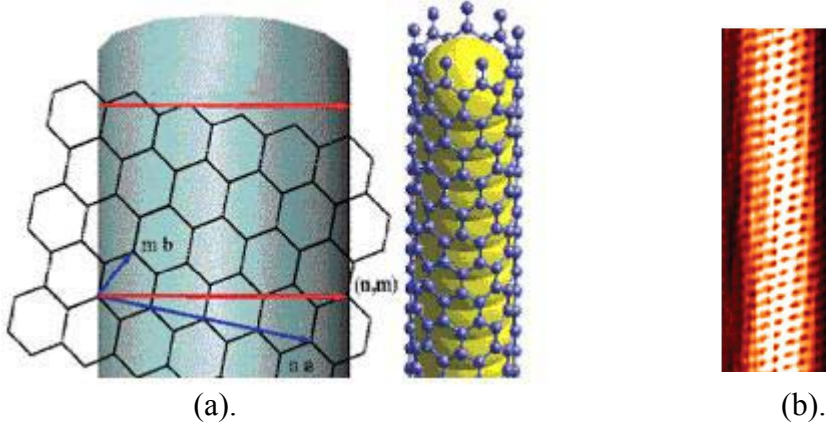
Ametalik bileşikler, elektronlar yerine ışığı akım taşıyıcısı olarak kullanarak, molekülleri makroskopik çevreye bağlama problemlerinin çözümüne de katkıda bulunabilirler. Bu moleküllerde, verici ve alıcı tarafları foto aktiftir. Işık ile belirli etkileşimler oluştuğunda elektron üretimine izin verirler. Bu sözde “fotonik teller” üzerinde, veri transferi ve veri saklama için olası adaylar olarak üzerinde çalışılmaktadır. Bu moleküler kabloların önemli karakteristiklerini anlama çabasıyla, bu alandaki pek çok araştırma lineer, konjuge oligomer’ler üzerinde yoğunlaşmıştır (33).

Erimiş porperin (porphyrin) halkalardan oluşmuş potansiyel moleküler kablolar ilk olarak Crossley ve Burn tarafından yapılmıştır (34–35). Konjuge porperin dizilerinin en yüksek dolu ve en düşük dolu olmayan moleküler yörüngeler (HOMO ve LUMO) genellikle sadece 2’ eV ile ayrılmışlardır. Eğer bu boşluk birazcık daraltılırsa moleküller, moleküler teller için gerekli olan faydalı elektriksel özelliklere sahip olacaklardır. Porperin’ in moleküler tel olarak kullanılmasında ki diğer önemli bir avantaj da, monomerik biriminin, yaklaşık olarak 16Å genişliğindeki boyutudur. Bu yüzden, lineer tetramer’ ler yaklaşık olarak 56Å yayılıma sahiptirler. Bu, tek başına bir elektriksel devrede beklenen boşluğu kapatmak için yeterince büyüktür. Foto aktif birim içeren porperin oligomer’ ler de sentezlenmişlerdir. “Fotonik moleküler teller” üzerine çalışmalar yapılmış ve porperin dizilerinin bir ucundaki ışığı emerek diğer ucundan farklı bir foton yaydıkları gösterilmiştir.

Bu sonuçlar oligo-tip moleküllerin iyi moleküler tel yapabileceğini ileri sürer. Temel kimyasal sentez yaklaşımıyla elde edilen nano yapıların en iyi örneklerinden biri olan karbon nanotüpler, moleküler ölçekli kablolarla diğer bir görünen ilgiyi temsil eder (36). Bu karbon yapılar, bir dikişsiz silindire sarılmış altıgen kafesli grafitli levha olarak düşünülebilir. Kalınlığı 2 ile 50 tabaka arasında değişen tek duvarlı nanotüpler (SWNT) veya çok duvarlı nanotüpler (MWNT) elde etmek mümkündür. MWNT durumunda, bireysel tüplerin elektriksel özelliklerinin, komşu tabakalar arasındaki etkileşimden dolayı, tüpten tüpe büyük oranda değişebileceği keşfedilmiştir. SWNT'lerin, bu yüzden, potansiyel moleküler kablolarla kullanımı daha uyumludur.

Karbon nano tüplerin elektriksel özelliklerini tespit etmek için değişik metotlar kullanılmıştır. Bu deneylerden ilk olanı, bir tüpün iki ucunu elektrotlara bağlayarak içinden akan akımı ölçmeyi içermektedir. Son yapılan deneyler tarayıcı kuvvet mikroskop (SFM, Scanning Force Microscopy) ile yapılmıştır. Bu metot tüpün toplam direncinin iki katkıda bulunan değere ayrılmasına imkân tanımıştır. Bunlar, kontak(temas) direnci (elektrottan ve SFM uçtan) ve SWNT'den oluşan direnç (37). Karbon nano tüp, grafitin bal peteğini andıran atom düzleminin bir silindir üzerine hiç bir kusur oluşturmada kesiksiz olarak sarılmış bir şekli olarak düşünülebilir. Şekil 4.5' te görülebileceği gibi, karbon nano tüpler (n,m) tam sayılarıyla tanımlanmaktadır ve elektronik özellikler n ve m sayılarının değerine bağlı olarak değişmekte. Örnek olarak, (n, 0) yarıiletken tüpte bal peteği altıgenleri iki kenarı tüpün eksenine paralel olacak şekilde yönelmiş. (n, n) tüplerinin tümüyle iletken bir karakter göstermekte. Kısaca çaplarına ve (n, m) değerine bağlı olarak karbon nano tüpler çok farklı elektronik yapıda olabiliyor, yarıiletken olanların bant aralıkları da geniş bir aralıkta değişiyor. Ayrıca (n, 0) yarıiletken tüpler radyal deformasyon altında iletken dönüşmekte. Bu özellik, normalde yarıiletken olan bir nano tüp boyunca çeşitli yerlere deformasyon uygulayarak metal-yarıiletken eklemleri gibi değişik elektronik aygıt yapımında kullanılabilen. Karbon nano tüplerin bir başka özellikler de, eksenleri boyunca çelikten bile kat kat dirençli, radyal yönde yüksek elastik özelliklere sahip olmalarıdır. Bu özellik, karbon nano tüplerin uzay asansöründe halat olarak kullanılması gibi fikirleri çağrıştırmış olsa da, daha gerçekçi

uygulamalar üzerine çalışmalar hızla artmakta. Karbon nano tüpler üzerinde çok sayıda kuramsal ve uygulamalı araştırmalar yapılmakta, ilginç prototipler geliştirilmektedir (38).



Şekil 4.5. Karbon tüpün atom yapısı. (a) Grafitin bal peteği görünümünde atom tabakası. Karbon atomları altıgenlerin köşelerinde yer alıyor. Karbon nano tüp, bu tabakanın bir silindir üzerine sürekli bir şekilde sarılmasıyla elde edilir. Kırmızı renkle gösterilen sarmal vektörü C , onun uzunluğunu ya da tüpün çevresini ve sarmal açısını belirleyen (n, m) ikilisiyle tanımlanmakta. (b) Bir karbon nano tüpün TTM görüntüsü

Böylece, karbon tüp moleküllerin tipi için sonsuz sayıda ihtimal vardır ve her nanotüp belirgin fiziksel özellikler sergileyebilir. Son yıllarda, tek duvarlı nano tüplerin (SWNT) sentezi, çarpıcı bir biçimde gelişmişliği ve uygun materyal miktarındaki artışı ifade etmektedir. Bu metotlar, seçici büyümeyi veya yarıiletken ve metalik nano tüplerin montajına izin vermemektedir.

Genel olarak, bir nanotüpteki en geniş direnç değerinin bir elektrot ile bir nanotüp arasındaki kontakt direncinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bachtold ve grubu dört-prob konfigürasyon içinde çok duvarlı nanotüpler hakkında çalışma yapmışlar ve tüpün öz direncinin $0.3 \Omega \mu m^{-1}$ kadar düşük olabileceken kontak direncinin $1 G\Omega$ kadar yüksek olduğunu bulmuşlardır (39). Nanotüp-elektrot birleşme noktasını SEM ışını ile tarayarak, görünüşte tüpü elektrota her yerde bulunan şekilsiz kirlitici karbon ile lehimleyerek, kontak direncini $60 k\Omega$ civarına kadar değiştirmişlerdir. De Pablo ve arkadaşları litografik olarak desenlenmiş elektrotlar üzerine tek duvarlı nanotüpleri karakterize etmek için taramalı kuvvet mikroskopu kullandılar. $44 k\Omega$

kontak direnci ve $0.15 \text{ V } \Omega\mu\text{m}^{-1}$ tüp özdirenci buldular (40).

Bu sonuçlar, karbon nano tüplerin, eğer iyi bağlanabilirlerse, nano ölçekte, çok etkili kablolar oluşturacaklarını ileri sürer. Karbon nano tüpler elektriksel özellikleri ve katı yapıları sayesinde iyi moleküler tel oluştururlar. Çok düşük dirençleri vardır ve çaplarını ve sarmalama açılarını değiştirerek iletkenliklerini ayarlamak mümkündür. Dezavantajları ise, açık olarak, belirli nano tüpleri seçici ve temiz bir şekilde sentezlemek için akım yetersizliği ve sonraki işlevselleştirmeler için yer eksikliğidir.

Son olarak, nanotüpler açık bir şekilde konumlandırılmalı ve bağlanmalıdır. Bu, şu andaki seri teknikler (elektron ışın litografi, taranmış sonda manipülasyon) tarafından sınırlıdır. Bu probleme İsrail'den ilginç bir çözüm önerildi: Buna, DNA'ya dayalı olarak yapılan transistörlerin kendi kendilerine yapılıp çoğalabilme yeteneklerinin, bir şekilde cihaz entegrasyonunu sağlayabileceği düşünülüyor (38).

DNA moleküllerinin elektronik devrelerde tel olarak kullanılması potansiyel olarak bazı avantajlar sunar. Moleküler elektronik ile ilgili çözüm bekleyen en büyük problem moleküller arası bağlanma ve nano metre ölçeğinde konumlandırmadır. Moleküler tanıma süreçleri kullanma ve moleküllerin süpramoleküler yapıların içerisine kendi kendine montajı, bu zorluların üstesinden gelmeye yardımcı olabilir. Bu konuda, DNA, uygun moleküler tanıma ve mekanik özelliklere sahiptir. İlk yapılan çalışmalar DNA fiberleri içerisinden akan akımın fiziksel ölçümünü içerdi ve bu deneyler DNA'nın yarıiletken veya hatta metalik tabiatta olduğunu ileri süren sonuçlar karışımını verdi. Bununla birlikte, Dekker ve arkadaşları tarafından yapılan bir seri deney; bu deneylerde bazı anahtar parametreler değiştirildi. Bu parametreler, DNA'nın taban çifti sırası, alt madde tipi, elektrotlar arasındaki mesafe ve kontak malzemesidir. DNA moleküllerinde herhangi bir elektronik iletkenlik kanıtı olmadığı şeklinde sonuçlandı (41). DNA'nın biyokimyasal çalışmaları, DNA üzerinden uzak mesafelere yük taşımayı tanımlamada şimdiye kadar yapılan en başarılı çalışmalar olmuştur. Bu çalışmalarda, foto oksidantlar ve guanin incelenmiştir. Çünkü guanin DNA'nın dört bazı içerisinde en düşük iyonizasyon potansiyeline sahiptir. Guaninin

bir yerde bir DNA ipliğine eklendi. Oksidasyon sürecinde ilk adım, oksidantların varlıklarını UV ışınlama ile guanin radikal katyonu (G^+) oluşturmaktır. GG ve GGG sıralamaları tek Gs'den daha düşük iyonizasyon potansiyeline sahiptir. Bu yüzden pozitif yük eğer uzun mesafe elektron transferini mümkün kılırsa bu G kümelerine göç etmesine ve DNA' nın özellikleri değiştirilmesine olanak tanır. Aynı zamanda kendi kendine oluşma yapar. Nano ölçekli elektronığın, oluşturmada kullanılan diğer potansiyel tellere karşı emsalsiz bir avantaj sunabilecek yönü de budur. Nano ölçekli cihaz oluşturmada kendi kendine oluşum potansiyelinin pratik avantajlarını kullanarak, ciddi bir şekilde üzerinde durulmalıdır. Çalışmalar çoğunlukla DNA molekülleri arasındaki iletkenliği anlamak üzerinde yoğunlaşmaktadır. DNA sarmalları içerisinde yük taşıma açık bir şekilde DNA taban sırasına, kusurlara, DNA molekülü ile yük vericileri ve alıcılarının etkileşimine ve lokal esnekliğe bağımlılık gösterir.

DNA'nın moleküler tel fonksiyonunu yerine getirebilme olasılığı da vardır. DNA moleküllerinin karmaşıklığı ve sonsuz varyasyon olasılığı şimdiye kadar, temel elektronik özelliklerinin kurulmasında güçlüklerle yol açmıştır. Potansiyel tel olarak, üzerinde çalışmalar yapılan, her birinin avantaj ve dezavantajları olan 4 ana tip molekül vardır. Üzerinde en çok çalışılan moleküler tel ailesi, π -sistemleri içerisinde iletim yapılan konjuge hidrokarbon zincirlerinden oluşturulmuştur. Bu kabloları hızlı ve etkili kılmak için birkaç yaklaşım üzerinde uyarlamalar yapılmıştır. Geniş ölçüde test edildi ve iletkenliği kanıtlandı. En büyük problem şu ki, bu molekülleri, tamamen fonksiyonel bir elektronik devrede ihtiyaç duyulan şekilde, nanometre ölçek üzerine konumlandırılması için bir metot yoktur. Bu problemin üstesinden gelmenin bir yolu, DNA' nın kendi kendini oluşturma özelliğinden yararlanmaktır. Fakat DNA' nın karmaşıklığı ve çeşitliliği, iletkenliği üzerinde tartışmalara sebep olmuştur (41). DNA' nın yüksek iletkenlik gösterdiği koşullar ve bunların nasıl değiştirilebileceği üzerine birkaç metot araştırılmıştır. Karbon nanotüpler de, nanotüp topolojisine bağlı olarak değiştirilebilen bazı çekici elektriksel özelliklere sahip oldukları için ümit verici adaylardandır. Fakat belirli tüpleri sentezlemek mümkün değildir ve şu anki metotlar değişik boyutlardaki

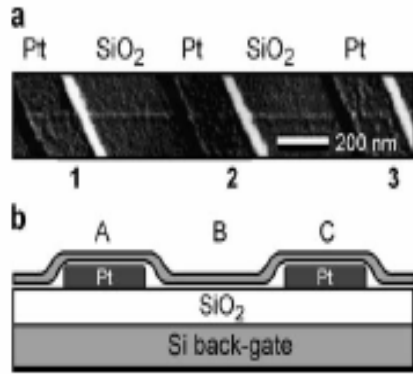
koleksiyondan özel bir nanotüpün çalışma için seçilmesini içermektedir.

4.2.3. Moleküler transistörler

Gelecekte cihazların yükseltme işlemi sergilemeleri çok önemlidir. Böylece sinyaller, uzun lojik işlemler zincirinin her aşamasında referans olabilir ve bir referans gerilimine geri getirilebilir. Lojik sistemler, harici çevre bozukluklarından ve termal dalgalanmalardan kaynaklanan gürültüye karşı ve kaçınılmaz üretim varyasyonlarından kaynaklanan sinyal değişimlerine karşı hassastırlar. Bu sebeplerden dolayı, moleküler elektroninin gelişiminin önemli bir adımı; moleküler bir tabaka ile birbirine bağlanmış source ve drain kontakları ile bir üçüncü kontak (geyt) oluşan ve source-drain akımını değiştirmek için kullanılan üç terminalli bir cihazın (transistör) gösterimidir.

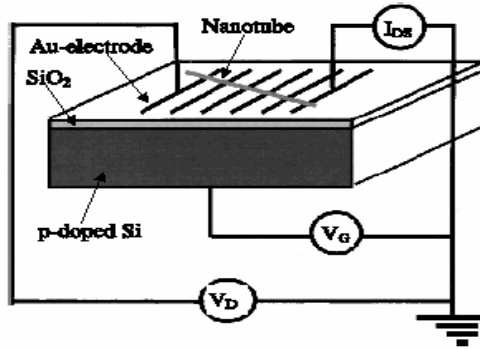
Temel kavram, elektrik alan ile bir molekülün iletkenliğini kontrol etmektir. Çoğu çalışmalar alan etkili transistörler üzerinde yoğunlaştı ki bu da transistörün en yararlı form olduğunu kanıtlar. Tans ve grubu karbon nanotüp kanallı bir alan etkili transistör ürettiler ve oda sıcaklığı koşullarında zayıf bir kazanç durumunu gösterdiler (43). Bu ilk CNTFET'lerin yapısı çok basitti. Bir SWCNT Source ve Drain olarak davranan iki Platin(Pt) elektrotunu köprülemek için üste yerleştirildi. (Şekil 4.6) Kendisi geyt elektrotu olarak kullanılan bir silikon ince tabaka üzerinde gelişen SiO_2 film macunu üzerine elektrotlar imal edildi. Cihazın elektronik karakteristikleri, uygulanan çeşitli geyt polarması (V_{gate}) altında iki elektrot arasında polarmayı tarayarak ölçüldü. Ortaya çıkan I-V eğrileri, bir yarıiletken nanotüp olduğunu gösteren lineerlikten kaymayı gösterdi. V_{gate} 'in pozitif değerlerinde, V_{gate} arttırıldıkça aygıt genişleyen bir boşluk gösterdi. V_{gate} 'in negatif değerlerinde, I-V eğrileri yaklaşık $1 \text{ M}\Omega$ değerinde dirence karşılık gelen omik davranış gösterdi. Bu davranış metalik nano tüplerde benzer yapılandırma da gözlemlenen davranışa benzerdir ve muhtemelen nano tüp ile elektrotlar arasındaki kontak direncinin sonucudur. Karbon nano tüpün çalışma fonksiyonu (4.5 eV) Pt elektrotlarındakinden (5.7 eV) daha düşüktür, fakat iki Pt elektrot arasındaki kontak,

nanotüp sonlarındaki potansiyeli, elektrotun Fermi seviyesine ilişitirir. Böylece, nanotüpün (SiO_2 tabakası ile temas halinde) orta kısmındaki valans band elektrotların Fermi seviyesini karşılamak için büküleceği tahmin edilmektedir. Bu karakteristikleri geliştirmek için birkaç yol önerilmiştir. SiO_2 tabakasının kalınlığını 300 nm den 5 nm' ye düşürerek ve nanotüpe temas direncini azaltarak, teorik çalışma frekansı 10 THz ve yaklaşık 3.5 kazanç tahmin edilmiştir. Bilgisayar lojiğinde, hem n ve hem de p kanal FET' lerden oluşan tümleyici devreler tek tipli transistör ve direnç yapılandırmalarına dayanan lojik devrelere oranla çok daha fazla performansa sahiptir. Böylece, nano tüp tümleyici lojik devreler geliştirmek için, CNTFET' lerin her iki tipini hazırlama yolları bulunması gerekmektedir. Bununla birlikte, elde edilen CNTFET' ler her zaman p tiplidir. N tipli CNTFET' ler üretme yolları, elektron donörleri kullanarak p tip aygıtları ilave etmek veya basitçe p-CNTFET' leri vakum altında ısıtmaktır. Yani O_2 gibi tutunmuş gazları yok etme sürecidir. Wang ve grubu ince SiO_2 geyt yalıtkanlı ve arka geyt' li bor katkılı p tip Germanyum nano tel yapmışlardır (44). Germanyum nano tel cihazlar iyi elektriksel özellikler sergilemektedirler.



Şekil 4.6. Nano tüp kullanılarak yapılan alan etkili transistör şeması

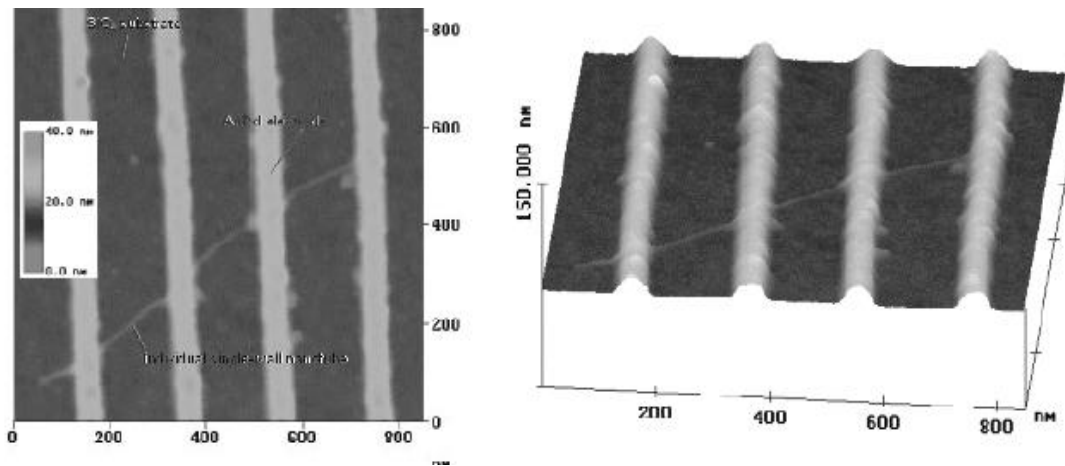
Birçok tipte karbon nano tüplere dayalı transistörler hazırlamıştır. Şematik bir gösterim şekil 4.7' de gösterilmiştir. Burada silikon bir çip metalik destek olarak kullanılmıştır. Oldukça kalın bir oksit tabaka (1 μm) elektrik yalıtımını sağlar. Elektron demeti litografisi ile çeşitli altın öncüler oksidin içine depolanmıştır.



Şekil 4.7. Nano tüp alan etkili transistörün şematik gösterimi.

Altın öncüler elektron demet lithografisi ile silikon çipin oksit tabakası üzerine depolanır ve bir nanotüp sulu süspansiyondan kontrollü absorpsiyonla öncülere çapraz olarak yerleştirilir. Altın öncülerden ikisi kaynak ve kanal elektrodu görevi görür ve silikon çipin kendisi bir kapı gibi davranır.

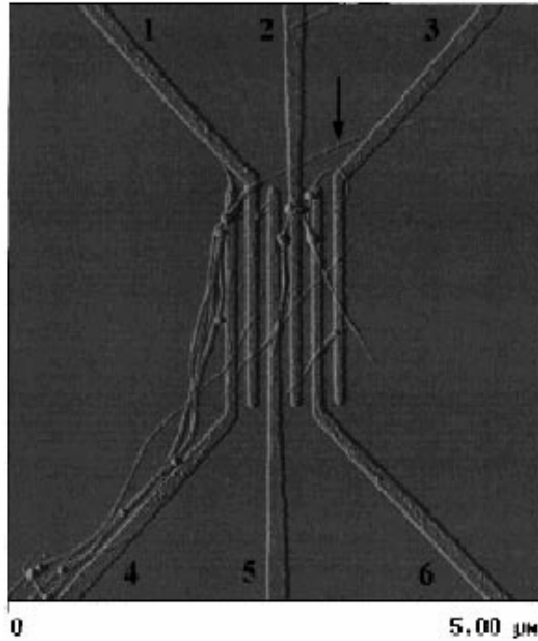
Öncüler yaklaşık 100nm genişliğindedir ve aralarındaki uzaklık da 100 nm dir. Nanotüpler sulu süspansiyondan kontrollü emilimle öncülere çapraz olarak yerleştirilmiştir. Şekil 4.8’de altın elektrotlar üzerine serili tek duvarlı nanotüpler, üç boyutlu görünüm şeklinde AFM görüntüsü olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Silikon çipler üzerine serili altın öncülerin ve tek duvarlı karbon nanotüplerin üç boyutlu AFM görüntüleri

Görüyoruz ki, tüp, tipik bir tek duvarlı tüp davranışı sergileyerek, altın elektrotların üzerindeki bantları takip eder. Gerçek deneylerde kullanılan birçok cihaz bu

mükemmellikten yoksundur. Şekil 4.9’da oldukça detaylı bir şekilde çalışılmış bir transistörün AFM görüntüsü gösterilmiştir. Bu durumda öncüler üzerinde birçok tüp bulunur ve zayıf tüpler, voltaj palsleri uygulanarak atılır. Sonuçta, sadece okla işaretlenmiş soldaki tüp kalır. Bu tüpün transistör olarak çalışması için temas ettiği iki öncü, bir kaynak gibi davranır ve kanal elektrotlar ve silikon çipin gerisinde yoğunlaşan altın film, kapı görevi görür. Bu transistörlerin fiziği tam olarak anlaşılamamıştır. Olası bir açıklama şöyledir: Özel bir nanotüp yarıiletken tiptedir ve elektronlar altın ve karbon farklı iş fonksiyonlarına bağlı olarak nanotüp üzerinden altın öncülere doğru akarlar. Bu nedenle tüp elektrotlar tarafından “p- doped” dur. Kapının elektrostatik alanı tüpün potansiyelini değiştirir ve dopingi bastırıp tüp yalıtımını sağlayarak elektronları geri çeker. Büyük biaslarda(klasik yarıiletken alan etkili transistörlerde olduğu gibi) çıkış karakteristiklerinde bir doyum (saturasyon) gözlemlenmez. Bu büyük olasılıkla eşik voltajını 100 mV değerinde durdurmak zorunda kalmamıza bağlıdır. Daha büyük eşiklerde nanotüpler yok olur. Düşük eşiklerde eğrilerin şekli henüz ayrıntılı olarak analiz edilmemiştir. Bu durumdan dolayı temas etkileri ile hesaplanmaktadır.

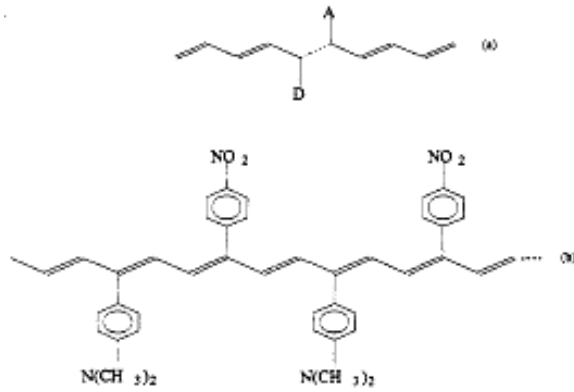


Şekil 4.9. Transistör çalışmalarında kullanılan gerçek elektrot konfigürasyonunun AFM görüntüsü.

Fu ve grup arkadaşları bireysel Ga_2O_3 nano şeritlerden faydalanarak Schottky jonksiyon diyot üretti ve elektriksel taşıma özelliklerini çalıştılar(45). Ga_2O_3 nano şeritler 500 nm kalınlığında Ti/Au pad'ler arasında termal okside edilmiş silikon yüzey üzerine yayılmıştı. Bir sonda nokta uzantısı odaklanmış iyon ışını (FIB) sistemi kullanarak, nano şeritleri ararken düşük ışın akımı kullanılarak yüzey canlandırılmıştır. Daha önceleri ilk Platin (Pt) tel iyon tarafından harekete geçirilmiş ve Platin tortusu tarafından desenlenmiştir. Bu metot alt madde yüzeyindeki temas halindeki nano şeritlerin iyon ışınlarıyla canlandırılmasına ve daha sonra gerçek yerinde Platin elektrotun nano şeritler üzerine konmasına izin veren bir avantaja sahiptir. Gözlemlenen I-V eğrileri n tipi Schottky diyot karakteristikleri sunar. Ga_2O_3 'in çalışma fonksiyonu yaklaşık 5.0 eV'a kadar varır. Platin elektrotun çalışma fonksiyonu, yaklaşık 5.7 eV. Daha yüksek olduğu için, oksit/metal kontak ara yüzü , Schottky diyot benzeri davranış gösterebilir.

Sato ve ekibi tarafından 10nm çaplı koloidal altın parçacıklarından üretilmiş tek elektronlu transistörün (SET) I-V özellikleri ölçülmüştür(46). 5 nm'lik Krom üzerinde 20 nm'lik Altın (Au)'dan oluşan Source, Drain ve Gate elektrotları bir SiO_2 yüzeyi üzerine elektron ışın litografi kullanılarak desenlenmiştir. Sitrat değiştirilmiş Altın parçacıkları yüzey üzerine konmuştur. Bundan dolayı sitrat örtmesi 1,6-heksanedithol'a dönüşmüştür. Altın parçacıklarının ikinci bir tortulaşması yüzey üzerinde kısa yalıtılmış Altın zincirleri oluşmasına yol açmıştır. Bu zincirlerden birisi tarafından köprülenmek üzere içerisinde Source ve Drain elektrotları bulunan örnekler üzerinde ölçümler yapıldı. I-V eğrileri 300, 77 ve 4,2 K'da toplanmıştır. 300 K'de sistemdeki her bir elektron herhangi bir parçacıktan kaynaklanan elektrostatik itmenin üstesinden gelmeye yetecek termal enerjiye sahiptir ve lineer I-V eğrilerine yol açan parçacıkların tünellemeye girmesi ve çıkması engellenmiştir. 4,2 K'da, sistemdeki elektronların termal enerjileri çok daha azdır ve "Coulomb blokajına" sebep olan elektrostatik itme bir etkiye sahiptir. Buradaki en aşikâr özellik, V_{gate} 'in değeri arttırıldıkça Coulomb kuşatmasının daralmasıdır. Sistemin sayısal sonuçlarıyla karşılaştırmaya dayanarak, bir dört jonksiyonlu sistem boyunca tek elektronlu tünelleme önerilmiştir.

Carter ve yardımcıları tarafından ortaya atılan, moleküler organik anahtar fikri ciddi teorik ve deneysel çalışmaların hedefi haline gelmiştir. Tipik bir Carter anahtarı, zincirlerin sonunda ya da yanal ekli olarak yedeklenmiş verici/alıcı gruplara sahip trans-poliaketen (t-PA) polienik bir iskelet fikri üzerine kuruludur. Önerilmiş bir çok yapısal modelde, anahtar mekanizması, taban durumdan uyarılmış düzeylere geçişlerdeki yapı düzeni değişimleri üzerine kurulmuştur. Tanaka, moleküler yörüngesel hesaplamalara dayanarak, verici(D) grup olarak NH_2 ve alıcı (A) grup olarak NO_2 (şekil 4.10.)’ den oluşmuş t-PA bir aygıtın çalışmayacağı sonucunu ortaya koymuştur(47). Ancak, son zamanlardaki bir rapor, şunu göstermiştir. D (A) grubu ve polienik zincir arasında bulunan bir ayırıcı (bir benzen halkası) anahtarlama işlemini olanaklı kılar. Bunun sebebi, ayırıcıların, anahtarlama fonksiyonuna izin vererek, yük transfer işlemi kapsamında gerçekleşen moleküler elektronik düzeyler arasındaki enerji ayrışmalarına sebep olmasıdır. Anahtarlama fonksiyonunun ayırıcıların yokluğunda gerçekleştiği gözlemlenmemiştir. Bu fikirlere ek olarak, Şekil 4.10 ‘da gösterilmiş bir birimin yapısal tekrarlamasına dayalı yeni bir organik nerdeyse-tek boyutlu cihaz tipi keşfedildi. Bu yeni tip cihazda iletkenlik, kimyasal dopinge ihtiyaç duyulmadan poliene’e dikey olarak uygulanan harici bir elektrik alanı (geçiş voltajı) sayesinde kolayca modüle edilebilir. İletkenlik mekanizması hareketli temel uyarılmalara (solitonlar, polaronlar, bipolaronlar gibi) gereksinim duymamaktadır. Ayrıca sistemin, uygulanan harici elektrik alan şiddetinin fonksiyonu olarak, alan etkili transistör (FET) davranışını anımsatan, lineer olmayan tepkisi de gözlemlenmiştir. Moleküler yapılanma ve yük transfer reaksiyonları konusundaki çalışmalar, moleküler Hamiltonian (Sonlu Alan Yaklaşımı) ‘daki statik harici elektrik alanını kullanarak, iyi bilinen Austin Method One (AMI) tekniği ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.10. Moleküler modeller.

Şekil 4.10. (a)'da moleküler anahtarlar, noktalanmış bağ arasında bir ya da daha fazla çift bağ içerebilirler. D ve A, iki anahtarlama kesimine sahip bir model molekülün gösterildiği şekil 4.10. (b)'de açıkça görüldüğü gibi, elektron transferi için aktif grupları ve ayırıcıları temsil eder.

Harici alanın yokluğunda, polien'nin tüm moleküllerle ilişkili geometriler oldukça basittir. Yanal grupların ikisi de polienik iskelete göre 65° döndürülmüş benzen halkalarını gösterirler ve bükülme açısı sadece, hassasiyetle, bunların arasındaki konjüge bağların sayısına bağlıdır. Harici alanın uygulanması, alan şiddeti kritik bir değere (~0,5 V/Å) ulaşıncaya kadar geometri ve yük dağılımı tam olarak modifiye olmaz. Bu noktaya kadar en önemli modifikasyon, her iki benzen yarımının bükülme açılarının sürekli azaltılmasıdır. Halka bükülme açılarının alan şiddetine bağlı fonksiyonun analizi, halkaların elektron transferi için bir kapı görevi gördüklerini göstermektedir.

Molekülleri elektronik cihazlarda anahtar bileşen olarak kullanmadaki temel sorun nanometre ölçekteki moleküllere elektriksel öncü eklenmesi ve bunların elektriksel taşınım özelliklerinin ölçülmesidir. Çeşitli aygıt yapıları ve ölçüm metotları önerilmiş ve bireysel moleküllerin elektriksel taşınım özelliklerinin hesaplanması üstüne çalışılmıştır. Ancak hala açığa kavuşturulacak bir çok konu mevcuttur. Hye-Mi Soa ve çalışma grubu, molekül tabanlı elektronik aygıtların fabrikasyonu ve elektriksel taşınım özelliklerini rapor etmişlerdir(48). İlk olarak, 20 nm boşluk uzunluğundaki metal elektrotlar elektron demet litografisi ile 500 nm kalınlığında termal olarak büyüyen SiO₂ ile kaplı Si alt maddeler(substrat) üzerinde 40 nm

kalınlığında Ti ve Au filmlerinin çift-açı buharlaşması ile hazırlanmıştır. Sonra kendiliğinden düzenlenen nitro-amonyum tek tabaka(SAM) molekülleri, konvansiyonel metotlar ile Ti/Au elektrotlarının tepesinde oluşmuştur. Kaynak ve kanalın birleştirilmesi için, boşluk uzunluğu ile karşılaştırılabilir ölçüde ya da daha büyük Au nano parçacıkları elektrostatik olarak kaplanmıştır. Elektrostatik kaplama için, boşluk etrafına Au nano parçacıklar içeren solüsyon damlatılmış ve yavaşça değişen eşik voltajı uygulanmıştır. Bitiş noktasının belirlenmesi için akım görüntülenmiştir.

Hazırlanan elektronik cihazın elektriksel nakil özellikleri ölçülmüştür. Cihaz çift-bileşimli yapıya sahiptir ve eğer SAM bir tünel bariyeri gibi davranacak kadar inceyse, tek-elektron tünelleme davranışı göstermesi beklenir. Bu doğrultuda kaplanmış Au nano parçacığı bir kuantum noktası gibi düşünülebilir. Bu tip bir tek-elektron transistörde, cihazın elektriksel nakil özelliklerini iki enerji düzeyi belirler. Au nano parçacığının Coulomb boşluğu enerjisi ve kuantum hapsedilme enerjisi. Oda sıcaklığında akım-voltaj karakteristikleri doğrusaldır ve 70 K' nin altında doğrusallıktan sapar. Geçit modülasyon eğrisi, Coulomb salınımlarına bağlı periyodik akım salınımları sergiler. Çoklu bileşim oluşumu olasılığına karşılık, iki salınım periyodu ayırt edilebilir. Taramalı elektron mikroskobu boşlukta kaplanmış iki Au nano parçacığı göstermiştir. 40 K üstü sıcaklıklara kadar Coulomb salınımı, varlığını korumuştur. Küçük boyutlu bir nano parçacık için, kuantum hapsedilme etkisi tek-elektron tünellemesi kadar hesaba katılmış olmalıdır.

4.2.4. Moleküler devreler

Şu anki bilgisayar teknolojisinde, dijital devreler temel lojik elemanlarla (tipik olarak NOR ve NAND kapılar) birbirine bağlanarak düzenli olarak üretilmektedir. Uygun kimyasal tasarım ile moleküler veya süpramoleküler sistem içinde değişik fonksiyonlar tümleştirilebilir. Kombinasyonel lojiğe ait böyle bir kimyasal yaklaşımın temsili örnekleri aşağıda gösterilmiştir.

AND ve OR Dijital lojik kapılı devreler, diyotlar üzerine temellendirildiğinden “diyot-diyot” lojik yapıları olarak adlandırılırlar. Bu yapılar yıllardır bilinmektedir. Bu iki devre için şematik diyagram şekil 4.11 (a) ve şekil 4.12 (a) da sırasıyla verilmektedir. Bu şekillerin her birinin (b) kısmı her lojik kapı için yeni moleküler uygulamalara benzer bir yapıyı göstermektedir. Dikkate değer bir konu şudur ki, bu moleküler lojik kapıların her biri yaklaşık sadece 3 nm x 4 nm ölçeğindedir. Bu transistör tabanlı devrelerde kullanılan bir yarı iletken çip üzerine fabrika edilen benzer lojik elementten yaklaşık 1 milyon kez daha küçük bir alandır.

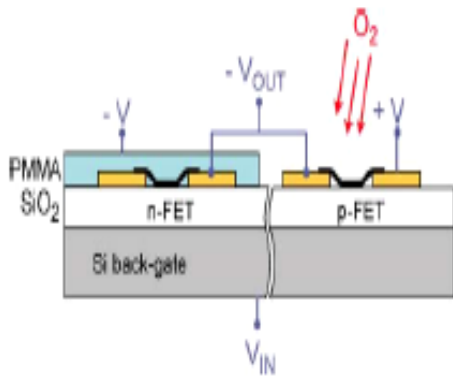
Her iki kapının da moleküler uygulamalarında polipenilen tabanlı doğrultmaç diyot yapıları, iletken polipenilen tabanlı Tour telleri vasıtasıyla birbirine bağlanmıştır. Alifatik zincirlerin yalıtımı, devrenin sadece direnç elemanları olarak kullanılır. Özel olarak, AND kapısı ve OR kapısının her ikisinin moleküler yapı diyagramlarındaki üç-metilen zincir, Ek-3 ve Ek-4’de sırasıyla şematik olarak gösterilen büyük R dirençlerine benzer. Bu büyük dirençler güç tüketiminin azalmasını sağlar. A ve B girişleri, her iki kapıdaki diyotların Doğru beslemesine neden olduğunda, C’de keskin bir çıkış voltajını sağlar ve üzerlerinden bir akım akar.

Ek-3 (b) de gösterilen AND kapısı ve Ek-4 (b) de gösterilen OR kapısı arasındaki ilk yapısal fark, moleküler diyotların yönlendirmelerinin ters olmasıdır. Ek-3 (c) ve şekil Ek-4. (c) her kapı için girişlerin ve çıkışların doğruluk tablolarını göstermektedir. Benzer diyot-diyot lojik kapıları farklı moleküllerden yapılabilirler.

Ek-2’de farklı moleküler yapıların ve moleküler iletkenlerin özellikleri verilmiştir. Bu moleküller, son zamanlarda doğrultmaç diyotların özelliklerini araştıran Metzger tarafından bulunmuştur. Metzger’in deneyine, Langmuir-Blodgett moleküllerinin kullanımı rehberlik etmiştir. Şematik olarak Ek-3 (a) ve Ek-4 (a)’da gösterildiği gibi, Metzger, günümüz yazarların diyot-diyot lojik önerileri üzerine dayanan AND kapısı ve OR kapısını ispat ederek göstermeyi denemiştir.

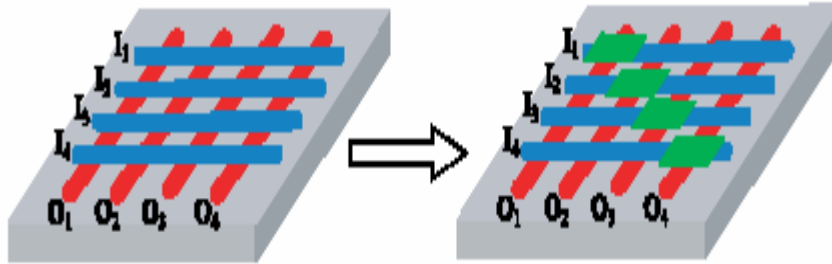
CNTFET’lerin üretim yolları geliştirilince, sonraki adım onlardan tümleşik devreler üretmek olmuştur. Bir lojik kapının basit bir örneği bir gerilim invertörü veya NOT

kapısıdır. Bu kapı, diğer bütün kapıların kendilerinden türetilebileceği üç temel devreden birisidir. Şekil 4.11’de iki CNTFET tabanına dayanan invertörün imalatını gösterilmiştir. Bir moleküller arası gerilim invertörü, iki CNFET bağlanarak üretildi. Bu invertör, sıradan bir CMOS invertörü ile tamamen aynı şekilde çalışır. CNTFET olayında, entegrasyonun en son seviyesi, molekül içi lojik devre üretimi olan aynı nanotüp molekül uzunluğunca bir tümleşik devre yapmayı ihtiva eder Üç altın elektrot üzerine tortulanmış küçük bir SWCNT yığınının atomik kuvvet mikroskopunda görüntülenebilmiştir.



Şekil 4.11. İki nanotüp FET kullanılarak bir gerilim invertörünün (NOT lojik kapısı) imalatı

Nano ölçekli cihazlar dizisini adreslemek için stratejiler geliştirme, biyolojik sensör dizileri ve nano bilgisayarlar gibi tümleşik nano sistemlere merkezdir. Lieber ve arkadaşları çapraz yarıiletken nano tel alan etkili Transistör (cNW-FET) dizilerinin moleküler seviye modifikasyonuna dayalı adresleme için genel bir yaklaşım anlatır. Burada, dizilerdeki kesişim noktalarının seçici kimyasal modifikasyonu NW girişlerinin özel FET dizi elemanlarını açık ve kapalı yapmasına yetki verir (49). Bu kavramın şematığı şekil 4.12’de gösterilmektedir. Kimyasal olarak değiştirilen cNW-FET dizileri kod çözücü devreleri olarak fonksiyon gösterir, kazanç sergiler ve multipleks ve demultipleks işlemlerine izin verir. Bu sonuçlar sinyallerin nanoölçekte geri yüklendiği adreslenebilir tümleşik nano sistemlerin gerçekleştirilmesine doğru bir adım sağlar.



Şekil 4.12. Çapraz NW dizi tabanlı adres kod çözümler. (4 yatay NW (I1-I4) giriş ve 4 dikey NW (Q1-Q4) çıkış sinyalli 4x4 cNW-FET dizisi. 4x4 cNW-FET dizisindeki 4 çapraz kesişim noktaları cevaplarını giriş kapı satırlarıyla ayırmak için kimyasal olarak değiştirilmişlerdir (yeşil dikdörtgenler). Bu girişin ve çıkışın açık veya kapalı yaptığı bir 1 kod üretti)

4.3. Bilgi Depolama Cihazları

Bilgi çağında, bütün veri işleme bilgi depolama ve uyum sağlama tabanına dayanmaktadır. Dijital bilginin programlanabilir olarak depolamanın, yük paketleri şeklinde olması sadece teknolojik değil aynı zamanda temel sınırlara da ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu yüzden yeni maddeler bulunması ve daha küçük, daha hızlı ve daha yüksek depolama yoğunluklu bellek aygıtları son derece önemlidir. Moleküllerin veya moleküler birleşimlerin bilgi işlemeye ve saklamada kullanılması moleküler kimyanın en göze hoş görünen yanlarından birisidir. Genel olarak, bellek aygıtları metal elektrotlar arasına sıkıştırılmış molekül tabakasından oluşur. Basit olarak, yazma, okuma ve bazen bir elektrottan diğerine moleküler tabaka arasından elektrik akımının akışını silme işlemlerini gerçekleştirmek şu şekilde olur. Bir yüksek gerilim sarsıntısı, akımın içerisinden geçmesini daha kolay veya daha zor hale getirerek moleküllerin direncini değiştirir. Bir düşük gerilim, moleküllerin direncini ölçebilir ve iki direnç seviyesi bilgisayar bilgisinin “1” ve “0”larını temsil edebilir.

Son amaç ne olursa olsun, altında yatan temel kavram moleküler iki kararlılıktır. Bu durum moleküler sistemin, harici kararsızlık durumundaki belirli bir aralıkta, iki farklı elektronik durumda gözlemlenebilme yeterliliği şeklinde tanımlanabilir.

Genellikle, durumlardan biri toprak durumu ve diğeri de yarı-kararlı durumdur. Moleküler iki kararlılık bir tekil moleküler veya molekül birleşimine isnat edilebilir. Bellek aygıtlarında kullanılabilmesi için, iki kararlılık bir cevap fonksiyonuyla birleştirilmelidir. Örneğin; sistemin durumunu ortaya koyan optik veya manyetik sistemlerin birleşmesidir. Moleküler anahtarlar olarak söylenen belirli organik moleküller ikilik bilgileri depolama potansiyeline sahip tipik cihazlardır.

4.3.1. Moleküler anahtarlar

Moleküler anahtarlar, kimyasal, elektriksel veya optik girişlerle uyarıldıklarında kendi yapısal ve elektronik özelliklerini ayarlayan moleküllerdir. Molekül bir giriş sinyali ile uyarıldığında, bir durumdan diğeri bir duruma konum değiştirir. İki kararlılık moleküllerin; elektron transferi, izomerizasyonu, bir asit veya konjuge tabanı ile oksidize olmuş veya indirgenmiş redoks aktif molekül ve komplekslik davranışlarının farklılıkları gibi pek çok özelliklerine dayandırılabilir. İki kararlılık durumunun iç dönüşümünü gerçekleştirebilmek için ışık, ısı, basınç manyetik veya elektrik alanlar, pH değişimi veya kimyasal reaksiyonlar kullanılabilir. Sıklıkla, bu dönüşümler tersine çevrilebilirler. Giriş uygulandığında, çıkış bir “düşük seviye” durumdan bir “yüksek seviye” duruma geçer. Giriş sinyali kapatıldığında kimyasal sistem başlangıçtaki durumuna geri döner. Çoğu durumda, moleküler anahtarlar; kimyasal, elektriksel, manyetik ve optik sinyaller ile adreslenirler. Bu girişlere cevap olarak, moleküler anahtarlar da; genellikle, çıkış olarak kimyasal, elektriksel veya optik sinyaller üretirler. Girişler ve çıkışlar, aynı kategoriden olmak zorunda değildirler. Örneğin, fotokromik anahtarlar optik girişleri optik çıkışlara çevirirler. Fakat elektrokromik anahtarlar elektriksel girişleri optik çıkışlara uyarlarlar. Fotokromizm, farklı soğurma spektrumuna sahip bir molekülün iki durumu arasındaki ışık ışınlaması tarafından indüklenen tersine çevrilebilir değişim şeklinde tanımlanır Fotoizomerizasyon sırasında, sadece soğurma spektrumu değil aynı zamanda kırılma indisi, dielektrik sabiti, yükseltgeme/indirgeme gerilimi, ve geometrik yapı gibi çeşitli fizikokimyasal özellikler de değişir. Bu moleküler özellik değişimleri, silinebilir optik bellek ortamına uygulanabilir. Fotokimyasal iki

kararlılığın temel koşulları çoğu kez fotokromik bileşikler tarafından yerine getirilir. Buna rağmen yorgunluk direnci, ısı kararlılığı, ve bozucu olmayan bilgi gönderme dahil diğer çeşitli gereksinimler tetikleme elemanı gibi uygulamalarda gereklidir.

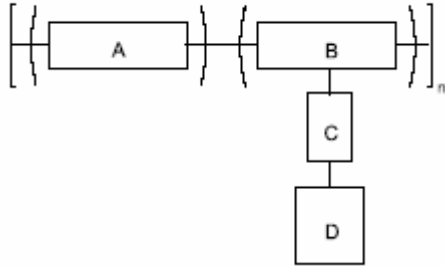
Akım anahtarlama moleküler elektroninin karşılaştığı en önemli problemlerden biridir. Moleküller ağırları, iki terminalli anahtarlama elementleri oluşturmaya izin veren ayrılmaz iki-kararlılık özelliği göstermelidir. Aynı zamanda, moleküller, özel dizaynlar haricinde, dejenere olmamış iyi tanımlanmış taban durumlarına sahip sonlu-boyutta kuantum mekanik sistemlerdir. İki-kararlılık moleküllerde az rastlanan bir durumdur. Belki en iyi bilinen örnek cis-trans (aynı tarafta iki atoma sahip olma durumu) dönüşümüdür. (bu dönüşüm, dönüşüm yönü üstünde kontrol kaybı nedeniyle moleküler elektronik için çok kullanışlı değildir.). Bir diğer zorluk moleküler düzey kararlılığı ve harici bir etkiyle (genellikle bir elektromanyetik alan) düzeyler arasında molekülleri kaydırma yeteneği arasında ki dengedir. İki özellik de iki kararlı düzeyi (ya da yarı kararlı) ayıran enerji bariyerleri tarafından yönetilir. Daha büyük bariyer daha kararlı düzeyler demektir, aralarındaki ayrılmayı daha da zorlaştırır. Daha küçük bariyer daha kolay anahtarlama demektir ama moleküller kuantum ve dalgalanmalara karşı daha kararsızdır. Uçucu olmayan moleküler anahtar dizaynı için iki değişik yaklaşım vardır. Birincisi molekülün elektronik yapısının iki-kararlılığının keşfidir. Elektronik anahtarlamanın bir farkı da molekülün akım düzeyinin iki-kararlılığıdır(50). Akımın iki-kararlılığının nedeni, dejenere olmuş moleküler kuantum noktasındaki çekici elektronik iyileştirmelerdir. Çekici iyileştirmeler moleküller itici Coulomb etkisine karşı koyabildiklerinde, vibronların (intramoleküler titreşim modları, momentumları olmadığı için phonon olarak anılmazlar.) güçlü elektron etkileşimleri sayesinde mümkündür. Bu durumda anahtarlama gecikme olmaksızın gerçekleşir. Ancak, sistemlerin bu mekanizmalara ulaşacak özelliklere sahip oldukları bilinmemektedir. İkinci yaklaşım molekülün şeklini keşfetmektir. Doğal kütle farklarından dolayı iyonlar elektronlara göre daha kolay kısıtlanırlar fakat daha zor hareket ederler. İyonik yaklaşımın birincil avantajı tamamen kararlı olabilmesidir. Sıcaklık dalgalanmaları yeterli alçak sıcaklıklara aygıtı soğutarak ulaşılabilir. Oysa kuantum dalgalanmaları ihmal edilebilir. iyon

mekanizmasının içsel bir dezavantajı yavaş anahtarlama hızıdır. Çeşitli anahtarlama mekanizmaları bugüne kadar yapılan çalışmalarda tanımlanmıştır. Heath ve Stoddard araştırma grubu geniş moleküler halkalarının bir pseudo-rotaksan dambıl bileşeninde yukarı aşağı kayma hareketinin sebebinin, aygıtlarında gözlenen direnç değişiminin neden olduğunu ortaya koyarlar (51). İki kararlı durum arasındaki halka hareketi TTF grubunun oksidasyon tepkimesi sonucu ortaya çıkar. Rotaksan tabanlı bellek aygıtlarında, alçak anahtarlama hızı 10–2 saniye olarak rapor edilmiştir. Moresco dört bacaklı porfirin türevlerinde konjugasyon değişimi amaçlı STM kullandı, fakat aslında, moleküler dirence etki eden molekül içindeki tünel uzaklığını değiştirdiler. Schumaker chiroptiene moleküllerin şekillerini ve eş simetrisini değiştirmek için bir elektrik alanı ve ışık dürtüsü kombinasyonu kullanmayı önerdi (52). Emberly ve Kirczenow da tartışılan anahtarlama mekanizmasına dayanılarak matris elementi ile örtüşen güçlü molekül – elektrot yönelim bağımlılığına dayalı moleküler anahtar önermişlerdir (53–54).

Yakın zamanda, Chen ve grubu iki adımlı indirgeme süreci üzerine kurulu yeni bir tip elektriksel anahtar önermiştir (55). Gerilim arttıkça, moleküler bağ başlangıçta yedek verici-alıcı biriminin yerine bir elektron indirgemesine girer. Bu sebeple sistem içinden elektron akışı için yük taşıyıcısı sağlanır. Başka bir gerilim artışı ikinci bir elektrona akımın sonradan gelen tıkaması ile indirgeme oluşturur. Bu tipin negatif direnç davranışı nitroamin redoksu içeren 2-amino-4,4'-di(ethynylphenyl)5'-nitro-1-benzenethiolate merkezli molekül üzerinde ispat edilmiştir.

Anahtar fotokromik yarımları içeren kenar gruplarına uygun bir biçimde bağlı moleküler bağdan oluşmaktadır. Moleküler mimari daha detaylı bir biçimde tartışılmıştır. Anahtarın mimarisi şekil 4.13' de şematik olarak ispat edilmiştir. A ve B blokları moleküler bağ gibi davranan konjüge polimer zincirin parçalarıdır. Prensip olarak, her iki r-konjüge polimer zincir kuyruğu (Detaylı bilgi için Ek-5'e bakınız) dikkate alınabilir. Ayırıcı C çeşitli kimyasal yapılarla gerçekleştirilebilir.(örn. olarak Ek-3' te verilenler).Uzunluğu, şekli ve diğer özellikleri kolayca ihtiyaçlara uygun hale getirilebilir. D grubu fotokromiktir, dipol momentinin büyüklüğü ve/veya yönelimi kararlı ve yarı kararlı formu arasında mümkün olduğu kadar değişmelidir.

Birçok fotokromik materyaller vardır. Açıkça, rastgele yapı taşı oluşturan blokların seçimi çalışır durumda bir moleküler anahtar oluşturmaz.



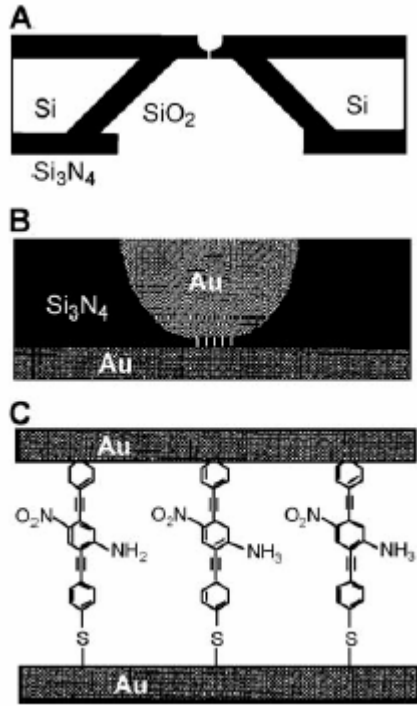
Şekil 4.13. Moleküler akım anahtarının şematik resmi.

4.3.2. Kendiliğinden düzenlenen tekil katman moleküler RAM

Kendiliğinden düzenlenme sistemi (SAM), nano parçacıkları atom ve moleküllerin kendiliğinden pürüzsüz bir alt maddede, enerji yönünden sabit sistemlerde insan hatasından kaynaklanan sorunlar olmaksızın emilmesini ifade eder. Asıl amaç geleneksel bant-aralıklı mühendislik alanının fraksiyonunda (örn: ince plastik moleküler kaplama) yüksek kaliteli 2D ve 3D yapılar üretmektir. Bu çok yönlülük uygun fonksiyonel gruplar ve seçilmiş yardımcı fonksiyonlar molekül ve nano parçacıklar kullanarak kendiliğinden düzenlenen sisteme izin verir. Üstelik, 3D toplamalı sistemler kendiliğinden düzenlenen alkanethiol tek tabakalar ve tabaka-tabaka nano parçacıklar ve hatta altın filmlerdeki organik moleküllerin vakum depolaması gibi fiziksel ve kimyasal metotları gibi bir çok yöntem birleştirilerek kolayca yapılabilir. Düzenegi sağlam bir tek-tabakanın, suda çözülme yüzeyinden katı alt maddeye taşınması (LB Metodu), araç ve zaman tüketen işlemler içerir. Yine de düzenlenmeli sistemler için böyle özel bir denge ya da işlem gerekmez. Aslında, bu metot bazıları tarafından “ ince plastik moleküler kaplama” olarak adlandırılır . Uygun olarak seçilmiş bazı gruplar (–SH alkan tiollarda) van der Waals ilişkisinden dolayı metilen zincirlerini düzenleyen, özellikle seçilmiş işlevlere sahip alt madde yüzeyinden dolayı (kemisorpiyon, fizisorpiyon veya kovalans yapımı) bir arada tutulur. Hidrokarbonun dış metil grubu SAM hidrofobitesine sebep olur ve SAM oluşumu için suyla temas açısı ölçümleri için kullanılabilir . Bu durumda oluşan yapı, kararlı ve dayanıklıdır. Çünkü bu düzenek çözücü veya bozucu maddelerden

etkilenmez. Tam tersine, LB filmleri daha az kararlıdır ve sadece bir van der Waals ilişkisi ile sürdürülebilirler. SAM'lerde asıl konu tek tabakanın polimere göre normal olan kalınlığıdır. Alkel zincir kalınlığının kontrolü, sık sık 0.1 nm'de olan tek tabaka kalınlığını değiştirmek için kolaylık sağlar. Üstelik, SAM moleküllerinin seçimi barındırdığı moleküler yapıyı değiştirerek bazı esnek işlevler içerir. Sonuç olarak SAM oluşumu, istenilen fonksiyon ve özelliklerle karışık yapılar oluşturmak için toplama yoluyla sistematik olarak nano tabakaları ve organik molekülleri değiştirerek nanometrik dengede karışık yapılar oluşturmak için bir metodu temsil eder. SAM'lerde düzenli nano yapılar yapmak için esnekliği en son bahsedilen teknolojik uygulamaya gidilebilir. Birçok deneysel teknik, SAM'ları araştırmak için uygundur. Örneğin SAM oluşumu verimliliği elektrokimyasal (kuartz kristal mikro denge, periyodik voltametri ve empedans spektroskopisi veya optik elipsometri, yüzey plazma rezonansı ve kızılötesi yansıtma emimi) ile işlenebilir. Bununla birlikte, SAM yapısı hakkında daha önemli sonuçlar STM, AFM içeren mikroskopik tekniklerle elde edilebilir.

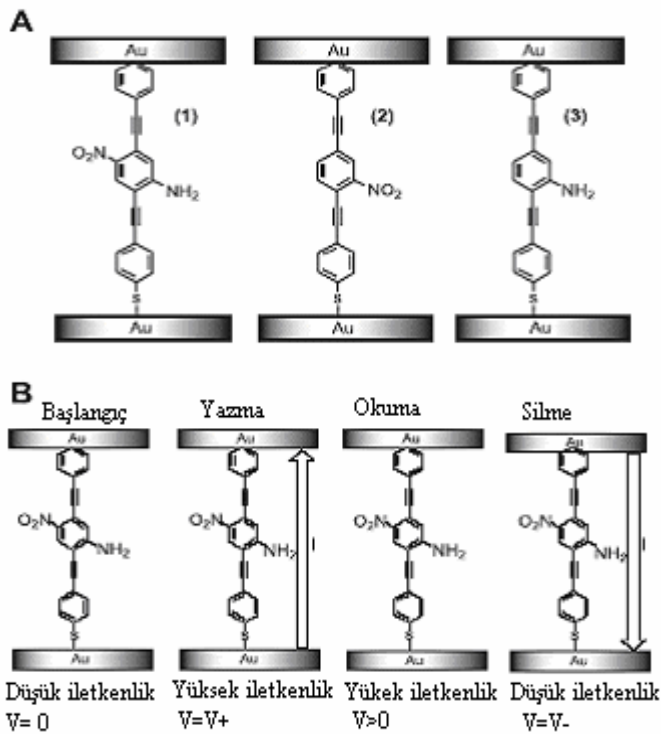
Chen ve grubu (56) ile Reed ve grubu (57) moleküler SAM'dan yararlanarak nanoölçekli elektronik olarak programlanabilen ve silinebilen bellek aygıtları ile rasgele erişimli belleğe (RAM) uygulanabilir bir bellek hücresi göstererek tanıtmışlardır. Şekil 4.14 aygıt üretiminin şemasıdır. Yaklaşık 1000 molekül, üstteki buharlaştırılmış Au kontak ile alttaki tiol/Au kontaklar tarafından oluşturulan Au kontaklar arasına sıkıştırılmıştır. Bütün aktif bölge 30–50 nm çapındadır. Üretim işlemin zorunlu özelliği, nano ölçekli aygıt alanı kullanmaktır. Bu durum az sayıda kendiliğinden düzenlenmiş moleküllere sebep olur ve aynı zamanda iğne deliği ve elektronik taşıma ölçümlerini engelleyen diğer kusurlu mekanizmaları ortadan kaldırır.



Şekil 4.14. SAM cihaz üretiminin şeması. (A) Askıda kalmış silikon nitrür zar içine asitle yakılmış nanopore ile bir silikon kesişim kısmı. (B) Gözenek alanda Au-SAM-Au jonksiyonu. (C) panel (B)nin patlaması

Şekil 4.15, moleküler aygıtların yapılanışını, depolama ve belleğin çalışma prensibini gösterir. Yazma ve silme pulsleri sırasındaki akan akımın yönleri oklar tarafından gösterilmiştir. Yüksek durumu bir depolanmış bit olarak kalır. Bellek aygıtı, yüksek ve düşük iletkenlik durumunun depolanması şeklinde işler. “1” için yazma, okuma ve silme serileri şöyle tarif edilir: başlangıçta düşük iletkenlik durumu (Düşük σ), bir gerilim pulsü uygulanması üzerine yüksek iletkenlik durumuna (Yüksek σ) değiştirilir (yazılır). Bu yazma pulsü sırasındaki akan akımın yönü diyagramda gösterilmiştir. “Yüksek σ ” durumu depolanan bir bit olarak kalır ve ardışık okuma pulslerinden etkilenmez. Deneysel sonuçlardan; nitro grubun bellek etkilerinden sorumlu olduğuna, amin grubun varlığının molekülün başlangıçtaki iletkenlik durumunu (muhtemelen moleküle tanıttığı farklı dipol dağıtımı sebebiyle) değiştirdiğine inanılmaktadır. Onlar farklı iletkenlik durumlarının molekül içerisindeki elektronlar tarafından tutulan farklı “set seviye”lerin sebep olduğunu ileri sürdüler. Molekül içerisindeki elektronlar tarafından tutulan farklı “set seviye”ler; ya farklı yük dağılımı (farklı dipol dağılımı gibi) ile farklı elektronik

durumlar ya da molekül içerisindeki farklı uygunluk durumları (dönüşlü uygunluk ve olası dönüşlü uygunluk gibi) veya her ikisi de anlamına gelebilir. Bu “set seviyeleri” molekülün çeşitli iletkenlik durumlarına yol açan farklı elektronik dağılıma sebep olabilir. Şekil 4.15’ da görülen üst iz aygıtı uygulanan giriş dalgası ve alt çizgi de RAM hücresi çıkışıdır. İlk pozitif puls bir bit yazarak hücrenin durumunu yapılandırır ve ikinci ve üçüncü pozitif pulsler hücreyi okur. Üçüncü puls hücrenin robust olduğunu ve durumunu tutmaya devam ettiğini (bit tutma süresi limitine kadar; bu gösterim çarpıcı bir şekilde uzun bir tutma süresini vurgular) gösterir. Negatif puls hücreyi resetleyerek biti siler. İkinci kez yapılan 4 puls seti aynı örneği tekrarlar ve pek çok saat süren sürekli işlemler gözlemlenmiş ve performansta herhangi bir bozulma olmamıştır.



Şekil 4.15. Moleküler cihazın yapılanması ve belleğin yonga plakası prensibi

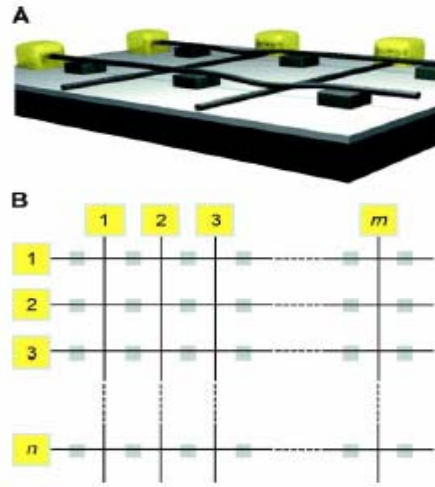
ince film bazlı bir FET üretmiştir ve kanal akımının geçiş voltajını değiştirerek ikiden fazla büyütme komutuyla düzenlenebileceğini göstermişlerdir (58) Dahası Garnier ve grubu baskı tekniği kullanarak üretilen plastik FET'i bulmuşlardır (59). Yang ve Heeger tarafından polimer kablo elektrik tüpü içeren bir alet hakkında yayınlanan bir rapor vardır (60). FET bazlı iletken polimer performansı oldukça umut vericidir ve bu aletlerin elektrik devrelerinde veya aktif matris yayıcı işlevlerde kullanılması, bu araştırmayı bu yönde yoğunlaştırmıştır. Bu aletlerin performans parametrelerinden bir tanesi de mobilitedir. Bu transistörlerde şarj taşıyıcı hareketliliği, uygulanan voltaja ve yalıtıcısına bağlı olarak $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V s}$ kadardır. Bu değerler inorganik yarı iletken aletlerden oldukça düşüktür ki onların mobilitesi $0.1-1 \text{ cm}^2/\text{V s}$ arasında değişir. 1990' da Friend ve arkadaşlarının ince PPV tabakasında elektrolüminansı (EL) bulmalarından beri Polimetrik LED'ler (PLED) dünya çapında çok büyük ilgi uyandırmıştır (61). CP' ler esnek, hafif ve geniş düzeneklerde kullanıldıkları zaman inorganik LED malzemelerin yerine ışık kaynağı olarak düşünülmüşlerdir. Bu malzemelerin bilinen lüminans malzemelere nazaran en büyük avantajları, kimyasal modifikasyon ile yayılan dalga boyu ayarı, düşük işlemlili/voltaj, esneklik, kolay işlem, düşük maliyet, geniş alan ve görünebilir alandaki çıkış renkleridir. Bazı CP'ler bu özelliklerinden dolayı ortadaki açık alan boyunca ışığı yayma ve yüksek kuantum özelliklerine sahiptir. PLED' in en basit şekli geçirgen ve iletken anot, yayıcı polimetrik tabaka ve metalik katottan ibaret cam bir düzenek içeren katmanlı bir yapıdır. Boşluklar ve elektronlar anot ve katottan toplanırlar. Polimetrik tabakada yansıtıcı bir ekso tonlar bileşimi ışık verir

Kahn ve Jay MARTinez bir bileşiklerin düşük dönme (Low-spin, LS) ve yüksek dönme (High-spin, HS) elektronik durum arasındaki işbirlikçi geçiş sergileyen bileşiklerin nasıl tasarlanabileceğini inceledi (62). Bileşikler, polimerize edilmiş organometalik küme zincirleridir. Bazı üçüncü geçiş metal polimer bileşikler bir LS ve bir HS durumlar arasında işbirlikçi geçiş sergilerler. Bu geçiş anidir ve sistem üzerinde bir bellek etkisi gösteren termal bir histerezis ile oluşur. Ayrıca, bu bileşikler içerisinde, dönme geçişi LS durumunda mor ve HS durumunda beyaz arasındaki iyi bilinen bir renk değişimi ile birlikte olur. Bu maddelerin geçiş

sıcaklıkları, moleküler alaşım içeriğine dayalı bir yaklaşım kullanılarak hassas olarak ayarlanabilir. Bu maddelerin bilgi depolama ve geri almada kullanılması beklenmektedir. Çeşitli moleküler durumları tersine ifade edebilme yeterliğine sahip maddeler, sıklıkla, tarih-bağımlı bellek etkilerinin istenen özneliliklerini sergilerler. Örneğin, bir uyarıcıya verilen histeretik cevap; uyarıların tarihine bağlı olarak verilen bir çevre koşullarında farklı durumlar sergilenmesini mümkün kılar. Sonuç olarak, moleküler bilgi depolama ve geri getirme, tutarlı tasarım seçeneklerine sahiptir.

4.3.4. Karbon nano tüp tabanlı bellek

Tek duvarlı karbon nano tüpler (SWNT' ler) kendilerini moleküler elektronikte yapıtaşları yapan eşsiz elektronik, mekanik ve kimyasal özellikler sergilerler. SWNT' ler tek boyutlu metaller veya yarıiletkenler gibi davranırlar ve büyük mekanik sertlikleri ve kimyasal hareketsizlikleri sayesinde, güvenilir, yüksek yoğunluklu giriş/çıkış (I/O) kablo dizileri oluşturmak için ideal maddeleri temsil ederler. Karbon nanotüpleri, hem moleküler cihaz elemanı hem de bilgi yazma ve okuma için moleküler kablo olarak kullanan, moleküler elektronik kavramı geliştirildi. Her aygıt elemanı; iki kararlı, elektrostatik olarak anahtarlabilir açık/kapalı durumlarına yol açan askıda kalmış çapraz nanotüp geometrisine dayanmaktadır (Şekil 4.18). Aygıt elemanları doğal olarak aygıtları oluşturan karbon nanotüp moleküler kablolar ile geniş dizilerde (Şekil 4.18 (a)) adreslenebilirler. Elastik enerji; sonlu ayırmada (üst nanotüp serbestçe askıda kaldığı zaman) minimum olan bir potansiyel enerjidir. Çekici van der Waals (vdW) enerjisi; askıda kalmış SWNT alt nanotüp ile kontağa saptırıldığında minimum olan ikinci bir enerji üretir. Bu iki minime iyi tanımlanmış kapalı ve açık durumlarına karşılık gelir. Sırasıyla; ayrılmış aşağıdan-yukarıya nanotüp jonksiyon direnci çok yüksek olacaktır. Halbuki kontak jonksiyon direnci, büyüklük sırasında daha aşağıdadır. Bir aygıt elemanı, nanotüpleri çekici veya itici elektrostatik kuvvetler üretmek üzere geçici olarak yükleyerek bu iyi tanımlanmış kapalı ve açık durumlarına anahtarlatabilmelidir. Bu anahtarlama moduna dayanarak, elementlerin bu çeşidi nano veya moleküler ölçekli elektromekanik aygıtlar olarak karakterize edilebilirler.

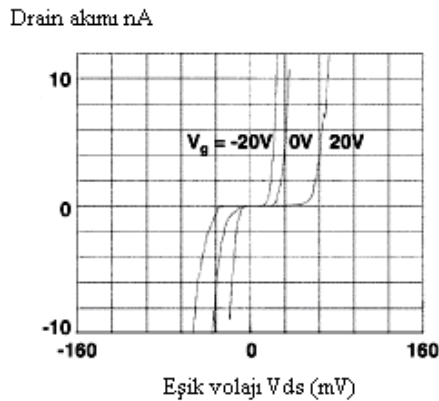


Şekil 4.18. Askıda kalmış nano tüp cihaz mimarisi. (a) iki eleman açık (kontakt) durumunda ve iki eleman kapalı (ayrılmış) durumda olmak üzere 4 jonksiyonu gösteren askıda kalmış dizinin üç boyutlu görüntüsü. (b) n_m aygıt dizisinin üstten görünüşü

Bu; terslenebilir, iki kararlı cihaz elemanları, kalıcı rasgele erişimli bellek ve eleman çalışma frekansı 100GHz'i aşan ve santimetrekareye 10^{12} elemana yaklaşan entegrasyon seviyesinde lojik fonksiyon tabloları oluşturmak için kullanılabilir. Bu konseptin yaşayabilirliği, detaylı hesaplamalarla ve terslenebilir iki kararlı nanotüp tabanlı bitlerin deneysel gerçekleştirmeleriyle gösterilmiştir. Tümleşik moleküler elektroniğe doğru sonraki adımları atmak için üzerinde durulması gereken birkaç sorun vardır. Öncelikle, şu anki SWNT örneklerinin, metalik (M) ve yarıiletken (S) tüplerinin rasgele dağıtımından oluştuğu şeklinde tanınmasıdır. Bu durum aygıtın okumasını karmaşıktırabilir. Bununla birlikte, araştırmacılar M tüpleri S tüplerden ayırmak için pek çok yol düşünmüşlerdir.

Karbon nano tüpler (CNT' ler) çok-duvarlı ya da tek-duvarlı tüpler oluşturacak şekilde grafit yapraklar üzerine yuvarlanmıştır. Uzunlukları mm mertebesine kadar büyüyebilir, ama SWCNT' lerde 1 nm den daha küçük çaplara sahip olabilirler. 1991 sonlarında, Iijima CNT' lerin ilk belirlenme ve sentezlenmelerini rapor etmiştir (63). Bunu elektronik yapıları ile ilgili ilk teorik çalışmalar izlemiştir. Tüp boyunca oluşan heksagonal karbon örgüsünü saran açıdaki değişikliklerin iletkenlik özelliğinde, metalik ya da yarıiletkenlik olarak sonuçlanacak şekilde, güçlü etkilere sahip olacağı tahmin edilmiştir. Son birkaç yılda, çeşitli araştırma gruplarının yayınladığı deneysel

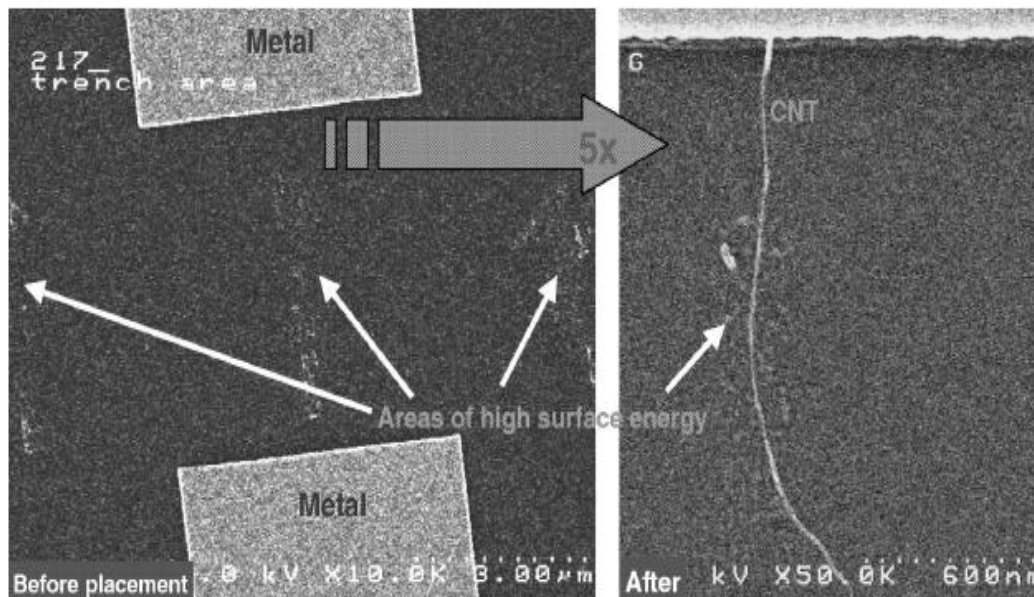
veriler ile kriyojenik sıcaklıklarda SWNCT' lerin, elektron taşınım ölçümlerinin kuantum bağ karakteristikleri ve metalik doğaları doğrulanmıştır. Eş simetri ve iletken arasındaki ilişki tarayıcı tünelleme mikroskopisi ve spektroskopisi kullanılarak gözlemlenmiştir. Bundan başka, alan etkili transistörlerinkine benzer özellikler oda sıcaklığındaki yarıiletken tüplerde ölçülmüştür. SiO₂ kaplı Si alt madde üzerinde oluşmuş bir Au elektrot çiftinin tepesindeki SWCNT' nin atomik güç mikroskobu görüntüsü elde edilebilmiştir. Alt madde yapı, bir geri geçit görevi görür. Elektriksel nakil verileri, elektrotlara eşik voltajı uygulayıp akımı ölçerek elde edilmiştir. Güçlü bir akım modülasyonu (5 kattan daha fazla) , tüpün doğasının yarıiletken olduğu önermesinden hareketle, geçit eşiği boyunca elde edilebilir. Geçit voltajına bağımlı bu davranışı sergilemeyen diğer tüpler metalik olarak değerlendirilir. Bu durumlarda, 4,2 K de ölçülen akım-voltaj (I-V) eğrileri geçit voltajının fonksiyonu olarak iletkenlik boşluğu ile birlikte (Şekil 4.19'a bakınız) Coulomb blokaj özellikleri sergiler. Yakın geçmişte, elektron spinlerinin uyumlu nakli ve mıknatıssal alanla direnç değişimi CNT' lerle ferromanyetik bağlantılı olduğu gözlenmiştir(64) Böylece CNT' ler nanometre ölçeğindeki yeni elektronik ve spin-elektronik aygıtların fabrikasyonu için çok potansiyel taşır.



Şekil 4.19. Bir Altın elektrot çiftini kapsayan metalik bir SWCNT' nin 4,2 K' daki akım-voltaj eğrileri.

Kaynak-kanal eşiğindeki sıfır noktasının merkezinde, büyüklüğü geçit voltajı ile değişim gösteren bir iletkenlik boşluğu gözlenmiştir. Bu özellikler, bu durumda SWCNT ve elektron eklemlerindeki tünelleme bariyerleri ile birlikte Coulomb blokaj etkisi gösterirler.

CNT' ler kimyasal buhar depolaması (CVD) ile olduğu gibi, ark deşarjı metodu ya da bir grafit çubuğa uygulanan lazer erime tekniği ile büyütülebilirler. İlk iki metot artan metalik yabancı maddelerle (büyütmeye sırasında kullanılan katalizörden) ve arıtım ve bireysel CNT' lerin çözülmesi için yaygın ıslak kimyasal işleme ihtiyaç duyan şekilsiz yan ürünlerle birbirine karışmış karışık bir CNT ağı ile sonuçlanır. İzole SWCNT' ler, bir surfactant kullanılmadıkça ya da tüplere kimyasal modifiye uygulamadıkça bir çok çözücüde çözünmezler. Bu çözünmezlik ve tüpler arasındaki van der Waals çekimi ipler halinde kümelenmelerine neden olur. Bu elektriksel iletim için yüzeyde bireysel SWCNT' lerin yerleşmesine ve işlenmesine engel olur. Aygıt uygulaması için CNT' lerin tercihen kendinden montajlı olarak önceden belirlenmiş yerlere yerleşmeleri oldukça önem taşır. SWCNT' lerin tercih edilen şekilde bağlanmaları için amonyak-sonlu kendinden montajlı tek tabakalarla kaplanmış bölgelere sahip yüzey desenleri oluşturmak için bazı çalışmalar yürütülmüştür (65). Şekil 4.20' de yüzey enerji işlemine göre seçici olarak yerleşmiş bir SWCNT gösterilmiştir. Yapılan çalışmalarda, seçicilik, tek tabaka biçimlendirmeden önce dirençli bir tabaka ile desenlenerek ve CNT yerleşiminin istenmediği bölgelerden dirençli tabakayı çekerek geliştirilmiştir. Bu ilk sonuçlar gösterir ki, çok sayıda CNT tabanlı aygıtlar kendinden montaj yoluyla üretilebilirler.



Şekil 4.20. Yüzey enerji işlemine göre seçici olarak yerleşmiş bir SWCNT

Şekilde: (a)metal yastıklarla(sıralama için) ve SWCNT'lerin tercihen bağlandıkları(örneğin amine-terminalli kendinden montajlı tek-tabakalar) kimyasal kaplı bölgelerle örneklendirilmiş bir alt maddenin tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsünü ,(b) ise alt maddenin SWCNT içeren sıvı bir süspansiyona maruz kalmasından sonra daha büyük bir görüntüsü verilmiştir.. Etrafta bir çok serbest alan varken SWCNT'nin yüksek yüzey enerjili bölgelerden birine yerleştiği görülmektedir.

Lieber ve grubu; bir ölçeklenebilir çapraz nano kablo alan etkili transistör (cNW-FET) mimarisine dayanan bir yaklaşım rapor ettiler(66). Bu mimaride, diziler içerisindeki özel kesişim noktalarının moleküler seviyede modifikasyonu; NW giriş hatlarının belirli çıkış hatlarını açık veya kapalı yapması için yetkili kılan bir adres kodunu tanımlamak için kullanılır. Karbon nanotüp tabanlı elektroniğin ilerlemesi, kesin yerleştirme ve karşılıklı bağlantıya izin veren kurulum stratejileri gerektirir. Moleküler yapıtaşları arasında tanımaya dayalı bir şema kullanarak, Keren ve arkadaşları, oda sıcaklığında çalışan kendi kendine toplanmış karbon nanotüp alan etkili transistorün gerçekleştirilmesini rapor ettiler(67). Bir DNA yapı iskelesi, molekülü yarıiletken tek duvarlı karbon nanotüpün kesin yerleştirmesi için adres ve de temas eden uzatılmış metalik kablolar için şablon sağlar.

5. MOLEKÜLER ELEKTRONİK İÇİN ÖRNEK UYGULAMALAR

5.1. Moleküler Elektronik Temelli Tam ve Yarım Toplayıcı

İkili yarım toplayıcı için iyi bilinen kombinasyonel lojik devresi şekil 5. 1. (a)' da gösterilmiştir. Moleküler yapının yeni dizaynı, şekil 5.1.(c)' de gösterilen kombinasyonel lojik diyagrama uygundur. Bu, AND ve OR kapılarının bileşenleri için daha önce önerilen moleküler yapıların yer değiştirmelerinden ortaya çıkar. Sonuçta ortaya çıkan yapının boyutları yaklaşık 10 nm x 10 nm olmalıdır ve şekil 5.1.(b)'de gösterilen doğruluk tablolarına uygun olarak davranmalıdır. Şekil 5.1 (c)' deki yapı, elektronik olarak iki binary(ikili) numaraları eklemesi gereken bir moleküldür.

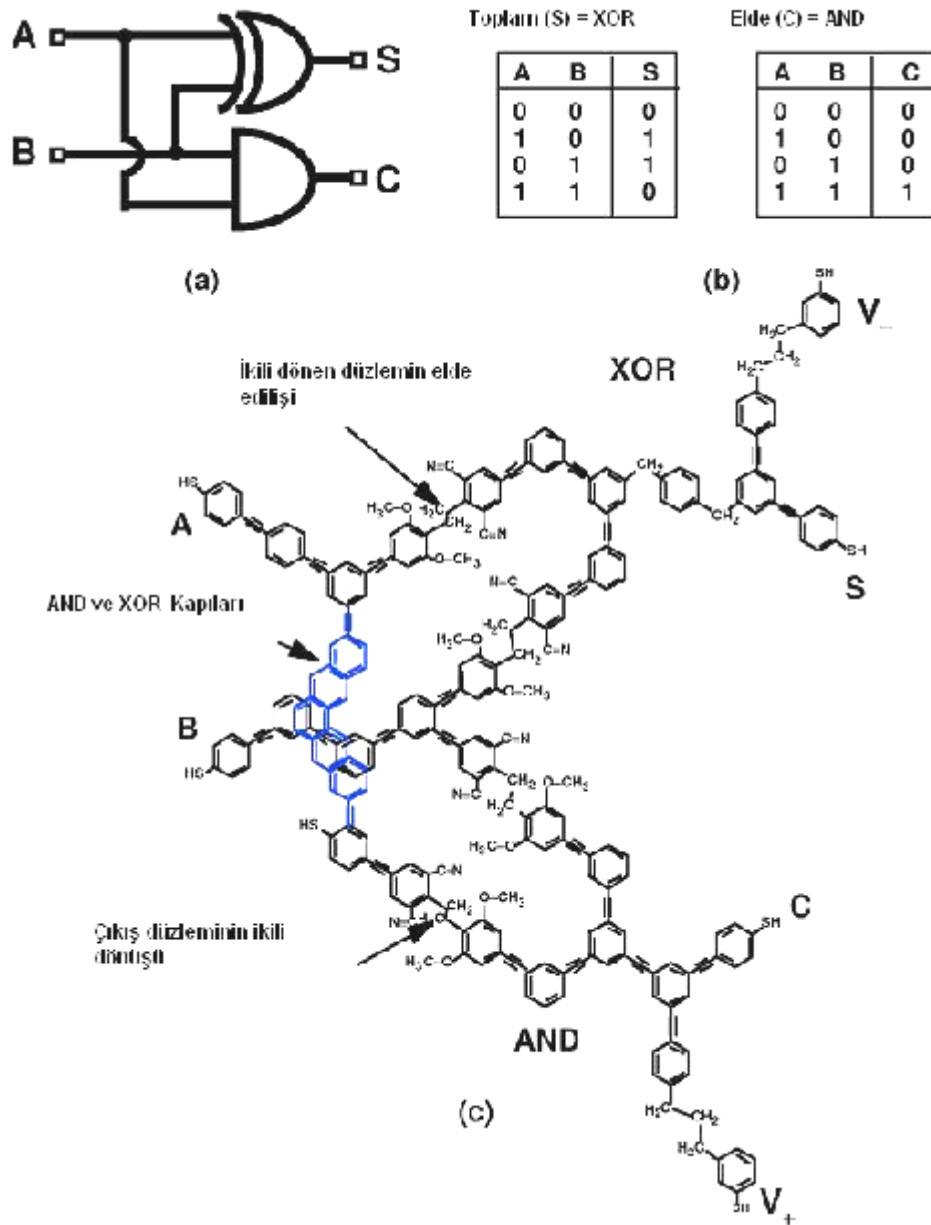
Şekil 5.1 (c)' de, S ve C tek-bit çıkışları temsil ederken, A ve B ekleyiciye tek-bit ikili girişleri temsil eder. Bunlar toplam ve taşıma bitleridir. Soldaki A veya B giriş uçlarının her ikisi ile yarım toplayıcı yapısında oluşturulan akımlar, moleküler lojik kapı bileşenlerinden geçmek için bölünürler.

Şekil 5.1' in bölüm b'sinde önerildiği gibi, XOR kapısı tarafından sağlanan lojik işlem; A' daki ekleyicinin girişine "1" ,B'nin girişine "1" ve S ucunda iki bit ve çıkışların toplamı şeklini alır.(Aritmetik ikili toplam $1+1= 0$, XOR işlemi hesaba katılmayacak). Eş zamanlı olarak, yarım ekleyicinin bileşeni AND kapısı, iki aynı 1 bitlik girişten taşıyıcı bit(carry bit) şeklini alabilir ve bu da sonucun C'deki çıkış gibi olmasını sağlar.

Ekleyicinin B giriş ucunu oluşturan Tour-tip moleküler tel, B'nin sağ tarafı XOR kapısının alçak giriş ucu ve AND kapısının yüksek giriş ucu ile bağlanır bağlanmaz molekül üzerinde dallara ayrılırlar. B ucundan akan giriş sinyali, kapıların iki girişi arasında, şekil 5.1. (a)'daki şematik kombinasyonel lojik diyagramla önerildiği gibi, uygun olarak bölünmelidir.

Moleküler yarım toplayıcı A ucundan akan diğer giriş sinyali, benzer olarak AND ve XOR kapılarının her ikisi arasında bölünmelidir. Şekil 5.1. (c)'de A'da sol tarafta

başlayan Tour teli, molekül düzlemi üzerinde direk olarak XOR'un en ucuna bağlanır. Bununla birlikte, düzlemin dışında bağlanmış-halka olan aromatik moleküler yapı, B ucunun moleküler tel düzleminde geçebilmek için gerekli olur ve sonra A ucunu AND kapısının düşük ucuna bağlar. Düzlem dışı bu moleküler bağlayıcı, şekil 5.1.(a)'da gösterilen şemadaki yaya benzer ki aynı zamanda B giriş ucundan geçmesi için kullanılır.



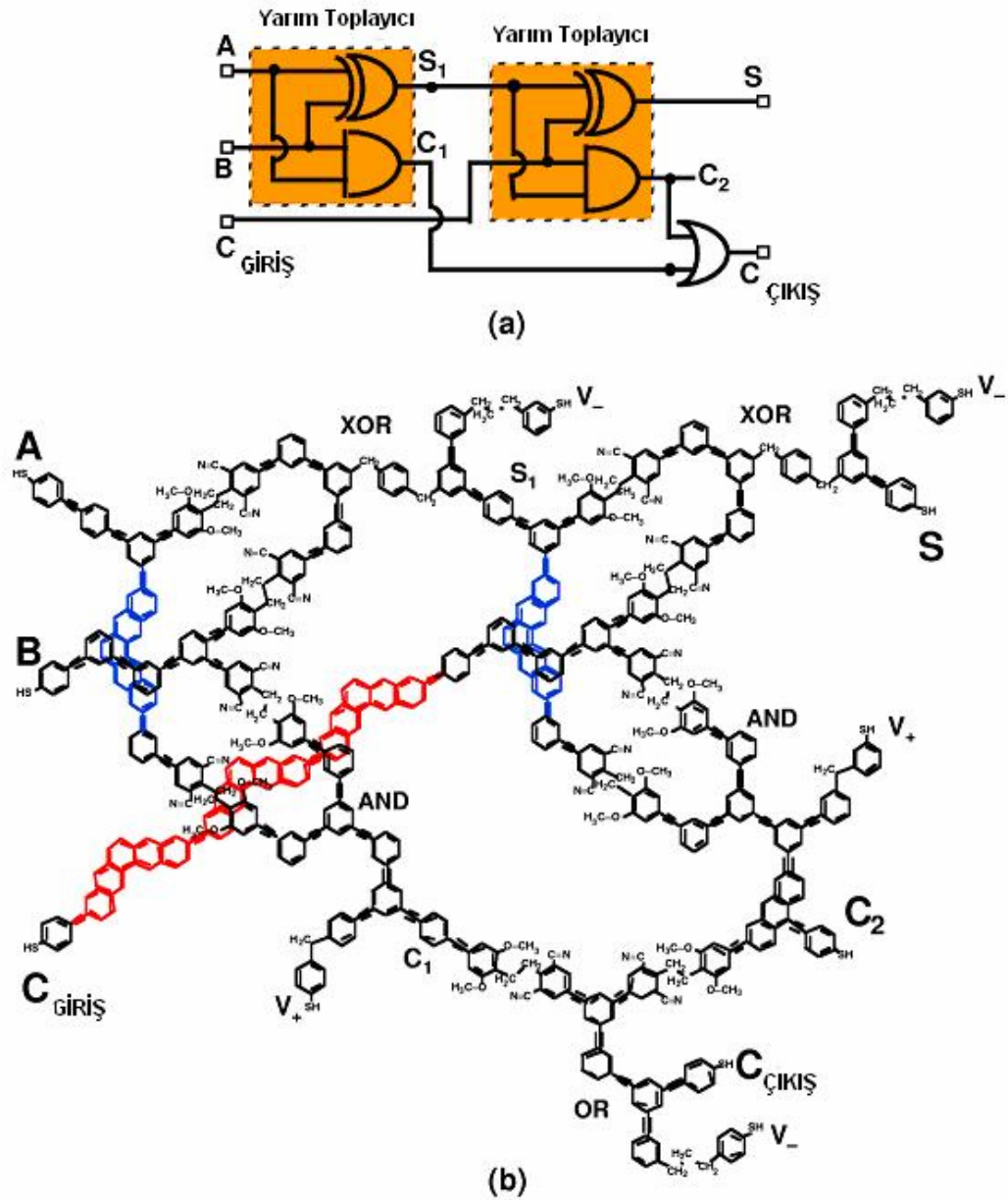
Şekil 5.1. İki diyot tabanlı moleküler lojik kapılardan yapılan bir moleküler elektronik yarı toplayıcı görülmektedir.

Böylece her molekülün giriş ucuna uygulanan çok küçük giriş bilgisi bölünür bölünmez yarım durumunda olur. Yarım toplayıcı gibi küçük diyot-tabanlı moleküler devreler için bu çok büyük bir problem olmamalıdır. Yarım toplayıcı molekül aynı zamanda, yapının sağ tarafında bölünmüş sinyalleri yeniden birleştirir. Bu nedenle sinyal kaybı çok büyük değildir. Sinyal kuvvetinin miktarının bir kısmı, şekil 5.1.(c)'de gösterilen sağ en üstündeki V ile tanımlanan yer yapısında hemen hemen tamamen yok edilebilir. Çıkışta, yer ucuna gömülmüş olarak gösterilen üç-metilen alifatik zincirin direnç şeklini alması istenir ki bu kayıpları küçük yapacaktır.

Hala ayrılmış diyot tabanlı moleküler elektronik devreler, sinyal-gürültü oranını emin bir fonksiyonda tutabilmek için belki de küçük olmak zorunda kalacaktır. Çünkü sinyal restorasyonunu etkileme için üç-terminalli moleküler elektronik cihazlar (örneğin, moleküler transistörler) belirlenen ölçülerde tasarlanmadı. Bu nokta bir sonraki bölümde şekil 5.2. ile belirtilmiştir. Burada, büyük bir moleküler devre yapısı ve moleküler elektronik tam toplayıcı gösterilmiş ve anlatılmıştır.

Polipenilen tabanlı iki yarım toplayıcıya ilave olarak bir OR kapısı eklenmiş ve şekil 5.2'de gösterilen moleküler elektronik temelli tam toplayıcıyı meydana getirilmiştir. Bu tam ekleyici molekülün boyutları yaklaşık 25 nm x 25 nm olabilir. Tam toplayıcı devre, iki yeni bit A ve B'nin toplamı olan S_1 bitine yeni taşıyıcı bit C_{IN} 'i ekler. C_{IN} , A ve B girişleri şekil 5.2. (a) ve şekil 5.2.(b)'nin solunda gösterilmişlerdir. Her iki şekilde sağında gösterilen sonuçlar şunlardır; bir-bit toplamı S, bu toplamla birleştirilen bir taşıyıcı C_2 , her iki yarım toplayıcıdan elde edilen C_2 ve taşıyıcı bitler C_1 bitlerini birleştirmek için kullanılan lojikal OR işlemi sonucu olan üçüncü bir bit C_{OUT} bit'idir.

Şekil 5.2. (b)'de önerilen moleküler yapıda, bu tam toplamayı sağlayacak, hızlı bir büyüme ve sadece birkaç bit içeren sayılar üzerindeki basit hesapları gerçekleştirecek moleküler yapının kompleksliği ortaya çıkar.



Şekil 5.2 İki diyot tabanlı moleküler yarım ekleyici ve bir diyot tabanlı moleküler OR kapısından yapılan moleküler tam toplayıcı devresi

5.1.1. Bireysel cihazların birleştirilmesi

Moleküler ölçekteki lojik kapılarının tasarımını basitleştirmek için, moleküler anahtarlamalar ve teller gibi temel cihazları içeren yapıları birbiriyle birleştirilebileceği önerilmiştir. Katı-durum devre tasarımları, birbirlerine karmaşık

bir devreyle bağlandıklarında, bireysel cihazların elektriksel özelliklerinin önemli ölçüde değişmeyeceği gerçeğini istismar etmiştir. Böylece tek parça makroskopik veya mikron ölçekli devrenin davranışı, devrelerde kullanılan yalıtılmış bireysel bileşenlerin elektriksel özelliklerinin kombinasyonu ile basitçe tanımlanabilir.

Katı-durum elektroniklerden farklı olarak, moleküler ölçek tellerin ve anahtarların küçük bölümleri büyük moleküler devrelerle birleştirildiğinde, bu moleküler bileşenler belki de devrelerde yalıtım yaptıkları gibi aynı şekilde davranmayacaklardır. Bunun yerine, kısa menzildeki güçlü kolombik etkiler ve bütün bileşenlerdeki elektronlar arasındaki parazit kuantum dalgaları, her cihazın karakteristik özelliğini değiştirecektir. Parazit kuantum dalgaları, birleştirilmiş moleküler devresindeki tek parça kuantum seviyelerinin sayısı, iki veya daha fazla ayrı moleküler cihazın seviyelerinin toplamına eşit olması gerçeğiyle kendini açıkça göstermektedir. Bu değişiklik, moleküler Fermi seviyesi etrafındaki seyrek yoğunluğu nispeten artıracaktır. İki katı-durum devre elementi birleştirildiğinde, benzer bir tek-parça toplam durumu olur ama durumun yoğunluğu elektron sayısına göre hala çok büyüktür ki, iletken moleküler birleşiminde umulduğu gibi dikkate değer bir etki olmaz.

Bununla birlikte her cihazda payı olan seviyelerin basit toplamı, her birleştirilmiş devreyi tamamen karakterize edemez. Her cihazdaki enerji seviyesi karışık olduğunda, seviyeler arasındaki çiftlemenin büyüklüğü, tüm molekülün bir bölgesine yerleşmiş belirli orbitallerin kalıp kalmayacağına karar verecektir. Aynı zamanda, moleküldeki elektron yoğunluklarının yeni dağılımı, HOMO-LUMO bant genişliği merkezine nispeten fermi seviyesini değiştirebilir. Bu, p-n tipli yarıiletken kavşaklardaki elektronların yeni dağılımına oldukça benzerdir. Şu anda, tüm moleküler elektronik devrelerin yanıtlarını önceden bilebilmek için, yazılım modellemesi bu kuantum mekaniğin önemli noktalarını hesaba katarak geliştirilmektedir

5.1.2. İletim mekanizması

Ratner ve grubu tarafından çok detaylı olarak anlatıldığı gibi, elektronlar, birçok mümkün mekanizmalarla moleküller üzerinden akabilirler. Farklı akım veya voltajdaki farklı mekanizmalar, büyük moleküler yapılarda küçüklere göre daha etkin olabilirler. Genişletilmiş yapılarda birden fazla tip mekanizma ortaya koyulabilir.

En basit moleküler elektronik sistemlerde, ilgili elektron taşıma mekanizması, her iki ucuna metal elektrot bağlanmış bir moleküler tel üzerinden akan elektronların yönetilmesidir. Günümüze kadar yapılan deneyler, polipenilen tabanlı moleküler tellerdeki elektron akışını, az sayıdaki tek-parça durumlar üzerinden uygun akış olarak bilinen rezonans yolu ile meydana gelebileceğini önermektedir. Elektrotlar arasındaki çok küçük moleküller için, çok daha kolay gözlemlenen taşıma mekanizması şudur: Molekül üzerindeki mümkün moleküler orbitaller ile modüle edilmiş bir metal elektrottan diğerine elektron tünelidir.

Bu rezonans olmayan “süper değiştirme” mekanizmasının kayıpların az olması avantajı vardır ama taşınım oranı tüneller arasındaki mesafe ile düşer. Bu nedenle, molekül, omik tele benzer olarak davranmaz. Çünkü taşınan elektronlar, iki metal kontağın orbitallerinde ilk önce otururlar. Süper değiştirme durumunda, bu orbitaller direk olarak molekülün orbitalleriyle karışmazlar. Molekül sadece dolaylı olarak elektron akışını artırır. Bu mekanizma ile iletkenlik meydana getirebilmek için, metal kontağın fermi seviyesi, molekülün HOMO ve LUMO enerjileri arasına düşmelidir.

Büyük polipenilen tabanlı moleküler devrelerde, yukarıda anlatılan iletim mekanizmalarının ikisi de önemli olabilir. Devrenin diyotlar gibi aktif bölgelerinde yapılan deneyler göstermektedir ki, tutarlı rezonans akışının avantajını almak mümkündür. Bununla birlikte, anahtarlama cihazları arasında, elektronların tutarsız bir akışla hareket edebileceğini sağlamak için, moleküler yapılar optimize olmak zorunda olabilirler.

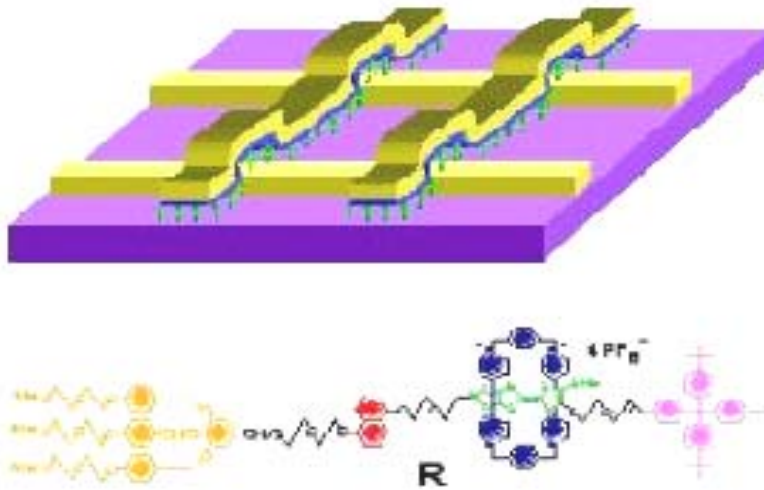
5.2. Nano Boyutta Moleküllü Anahtar Devresi

Moleküler elektronik, nano devreler kurmak için kritik boyutun molekül boyutlarıyla alakalı olduğu alternatif bir yol sunar. Rotaksanlar $1 \mu\text{m}^2$ lik alanda 8×8 lik bir ızgara tel(crossbar) oluşturmak için metal nano teller arasına sıkıştırılmışlardır. Izgara teldeki her çapraz çakışma noktasındaki direnç geri döndürülebilir. Her geçidi bir aktif hafıza ünitesi olarak kullanarak ızgara tel devreleri tekrar yazılabilir ve $6.4 \text{ Gbits cm}^{-2}$ 'lik hafıza yoğunluğu ile kalıcı olarak işletilebilir. Dirençleri, belirli çapraz çakışma noktalarına sabitleyerek, ızgara telin iki 4×4 alt dizisi üçüncül alt dizinlerdeki bellek bitlerini okuyan multiplexer ve nano boyutta demultiplexer olarak yapılandırılmıştır. Fonksiyonel nano-elektronik devreleri kavramak için, araştırmacılar üç problemi çözmeliler: Elektrik akımını açan yada kapatan nano boyutta bir cihaz icat etmek, hafıza ve/veya mantık fonksiyonlarını yapmak için bu cihazların birçoğunu kontrollü bir şekilde birbirine yada diğer dış sistemlerle bağlayabilen nano boyutta bir devre kurmak ve devrelerin diğer sistemlerle iletişim içinde olmasını sağlayan alt-seviye ayrıntılarından bağımsız çalışan bir yapı tasarlamak. Cihaz seviyesinde, moleküler elektronik araştırmacıları son olarak tünelleme birleşimlerini gösteren, negatif difrensiyel dirençli cihazlar, elektriksel yapılandırılabilir anahtarlar ve tekil karbon nanotüplerden yada tekil molekülden yapılan transistörlerle kayda değer bir aşama kaydetmişlerdir. Devre seviyesinde, cihazlar temel bellek ve mantık fonksiyonlarını ayrı ayrı yapmak için birbirine bağlanmışlardır. Yapısal mevzular hala önceki safhalardadır ama nano-elektronik devreler için uygun dizaynlar tartışılmış ve patentlenmiştir.

Yukarıda belirtilen üç maddeyi yerine getirmek amacıyla şekil 5.3 (a)'da gösterilen iki boyutlu şebekedeki moleküler anahtarları bağlamak için bir ızgara tel yapısına dayanan nano boyutta devreler sulmuştur. Izgara tel (crossbar)'in birçok avantajı bulunmaktadır. Öncelikle, bellek ve/veya mantık uygulamalarında kullanılan ayarlanabilir büyük ölçekli jenerik devreler oluşturmak için ızgaradaki tel sayıları rastgele ayarlanırken tel boyutları da sürekli bir şekilde moleküler boyuta kadar ayarlanabilir. İkinci olarak, örneğin CMOS gibi nano devrelerin dış devreler ve

sistemle verimli iletişimine olanak sağlayan bir demultiplexer ile bireysel olarak 2^N nano-tellere yönlendiren $2N$ iletişim tellerine ihtiyaç duyar. Üçüncü olarak, nano fabrikasyon işlemi sırasında doğabilecek kusurlu elemanları tolere edebilecek tekrar yapılandırılabilir bir yapıdır. Dördüncü olarak, sürgünün basit fiziksel yapısı nano boyutta üretimin potansiyel ucuz ve muhtemel olmasını sağlar.

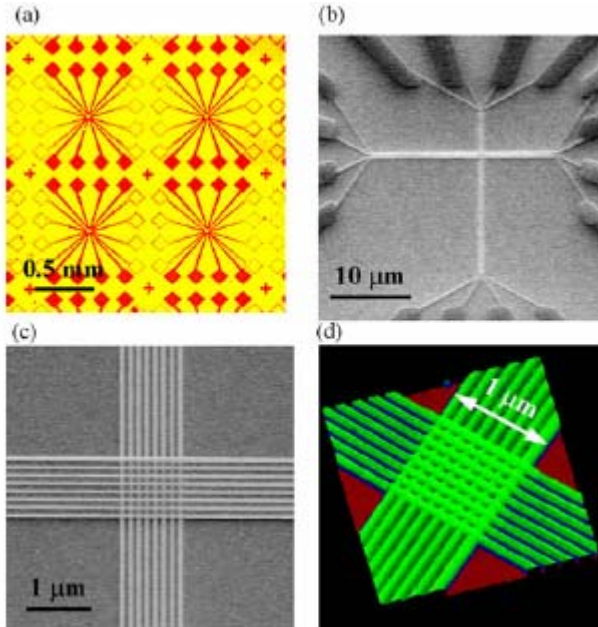
Litografi tesiri 10-nm altında detay boyutlarıyla yüksek işlem hacmi ve düşük maliyetle üretim yapan yeni bir nano ölçekli işlem tekniğidir. Buna ek olarak elektron demet litografisinde oluşturulan yüksek enerjili elektronlara zıt olarak imprintasyon aktif moleküller dahil hassas devre elemanlarına zarar verilmesine de engel olur



Şekil 5.3. Izgara tel yapısına dayanan nano boyuttaki devreler

Yukarıdaki şekilde ızgara tel devre yapısının şematik gösterimi verilmiştir. Rotaksan (yeşil)'in tekil katmanı tabanda Pt/Ti (altın, sol-sağ) ve üstte Pt/Ti nano-tellerinin (altın, üst-alt) düzeninin arasına sıkıştırılmıştır. Şekil 5.3' de iki kararlı durumu olan Rotaksan'ın moleküler yapısı verilmiştir. R, molekül hidrofobik (mor) ve hidrofilik (turuncu) durdurucuya sahiptir. Rotaksan yüzük bileşeni olarak cyclobis'e sahiptir (paraquat-p-phenylene) (koyu mavi) ve destekleyici karşit iyonlar heksaflorofosfatlardır.

Bu bölümde aynı rotaksan moleküllerinden aynı işlemle yapılan aletleri içeren nano ölçekli devreler üzerine yoğunlaştık. Bu birçok ızgara tel aletinin inanılmaz fazla yoğunlukta bellek devreleri olarak nasıl yapılandırılmasının ve ardından bunların nasıl bellek ve mantık fonksiyonlarını entegre edecek demultiplexer olarak çalışacaklarını gösterilmiştir. Şekil 5.3’de şematik olarak gösterildiği gibi ızgara tel devreleri, tesir litografisi yöntemiyle üretilmişlerdir. Tekil tabakalı rotaksan molekülleri alt Ti(3 nm)/Pt(5 nm) ve üst Ti(11 nm)/Pt(5 nm) nano telleri arasına sıkıştırılmışlardır. Devredeki en temel eleman her üst geçitte oluşturulan geri dönüşümlü veya kalıcı anahtar olarak çalışan Pt/rotaksane/Ti elektrik kutusudur ve bunun gibi 64 anahtar $1 \mu\text{m}^2$ ’lik alan içinde 8×8 lik ızgara tel devresi oluştururlar. Bu işte kullanılan iki kararlı durumu olan amfifilik rotaksane **R** ‘nin yapısı şekil 5.3’ de gösterilmiştir. Molekül, iki mekanik biçimde kenetlenmiş bileşenlerden bir yüzük ile çevrilmiş dambıl meydana getirir. Merkezi shaftın uçlarındaki biri hidrofobik diğeri hidrofilik olan büyük durdurucular molekülleri amfifilik yaparlar ve ayrıca tek katmanlı filmde molekül başına büyük alan üretirler. Temsili ızgara tel devrelerinin optik mikroskop, tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu görüntüleri ve onların test yapıları şekil 5.4’ te gösterilmiştir.

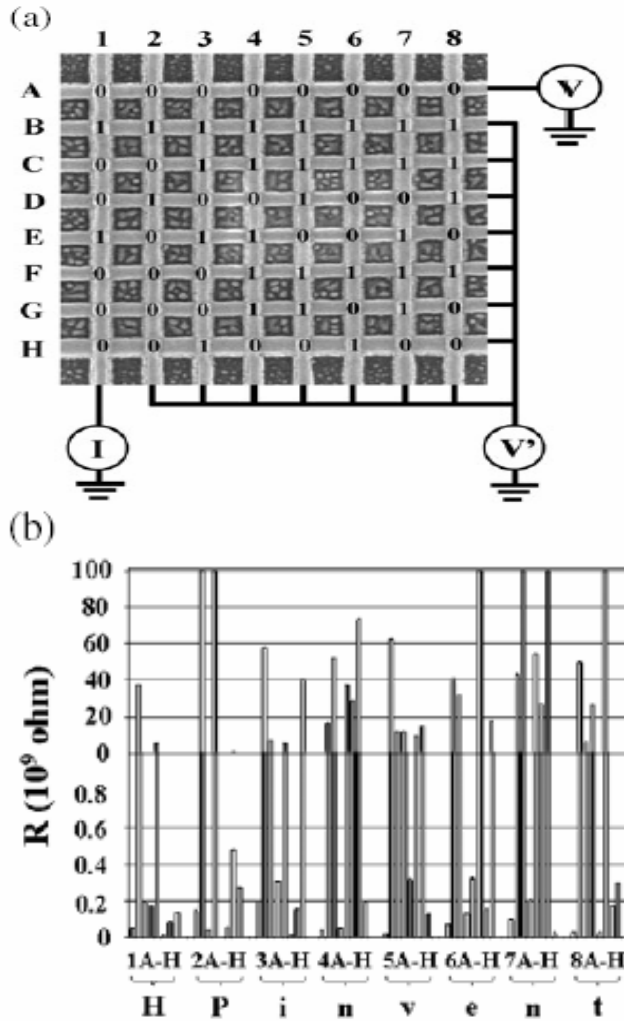


Şekil 5.4. Temsili ızgara tel devrelerinin optik mikroskop, tarayıcı elektron mikroskobu ve atomik kuvvet mikroskobu görüntüleri

Şekil 5.4.(a) 625 test devresinden dört tanesinin dizisinin optik mikroskop görüntüsü, merkezdeki nano ölçekli devrelere yol gösteren micron-ölçekli bağlantılar ile her birinin 16 pedini gösterir. (b) Kendilerinin mikron ölçekli bağlantı dizilerine dik olan iki bağımsız SEM görüntüsü; (c) merkez alanda birbirini kesen iki nano tel setini gösteren SEM görüntüsü; (d) sürgünün 3D AFM görüntüsüdür.

AFM görüntüsünde nanometre yanal çözünürlük elde etmek için bir karbon nanotüp uç (ProbeMax) kullanılmıştır. Baskı kalıbındaki nano tellerin ölçülmüş genişliği ile tutarlı olan nano tellerin ölçülmüş genişliği 40 ~nm'dir. Alt tabakaya transfer edilmeden önce Langmuir 'un yüzeyindeki bilinen molekül yoğunluğundan bilinen iki elektrod arasına sıkıştırılmış ~1100R moleküllere uyan üstgeçidin her devresindeki aktif cihaz alanı ~1600 nm²'dir.

8 × 8 ızgara tel devreleri ilk olarak oda sıcaklığında çevre koşullarında 64-bit rastgele giriş belleklerinde test edilmişlerdir. Test sırasında devredeki tüm 16 nanoteller yerlerini tutan kontak pedleri ve Electroglas 1034X prob istasyonu üzerindeki uyan prob kartıyla elektriksel olarak anında yönlendirilir. Voltaj kaynaklarını her nanotele bağlayan bilgisayar kontrollü anahtar matriksi ve seçilen çıkış, nanoteline ampermetre ile bağlanmıştır. Şekil 5.5.(a), belleğin yazma ve okuma modları için test konfigürasyonunu gösteren şematik diyagramdır. Izgara tel'e bir bit yazmak için , ızgara telin karşılık gelen kolon ve satırları üst nanotele V şiddetinde bir voltaj darbesi uygulayarak ve alt nanoteli topraklayarak seçilmektedir . İdeal olarak, diğer bitlerin yanlışlıkla yazımını engellemek için $V^l = V/2$ büyüklüğünde bir voltaj darbesi diğer tüm kolon ve satırlara aynı anda uygulanmalıdır. Başta 0.5 sn süreli ve 3.5 V büyüklükteki bir voltaj darbesi (0.5V'de ölçülen $5 \times 10^8 \Omega$ altındaki ızgara tel direncini azaltan) uygulanmıştır. Aksi takdirde Bit başarılı bir şekilde yazılana kadar yada 7.0V'a (bitin hatalı olduğu bildirisi geldiği) ulaşana kadar voltaj pulsu 0.5V'luk adımlarla artırılmıştır. Belleği okumak için $V = 0.5$ V luk bias voltajı topraklanan ($V^l = 0$) diğer tüm kolon artı satırlara ve seçilen satıra uygulanmıştır. Okunacak bitin direnci sade biçimde sadece seçilen kolondan toprağa akan akımın ölçülmesiyle okunabilir.



Şekil 5.5. Bir 64-bit rastgele giriş belleği şeklinde ızgara tel.

Yukarıdaki şekilde; (a) bellek için ideal ‘yaz’ ve ‘oku’ modlarıdır. Bir bit yazmak için, V 3.5V’dan 0.5’lik basamaklarla bit yazılana kadar yada 7V’a ulaşana kadar artırılır. Bu esnada $V^1 = V/2$ ’de tutulur. Biti okumak için, $V = 0.5$, ve $V^1 = 0$ olur. (b)’de hatasız sürgüye bir bölüm bit yazıldıktan sonra devredeki her geçitteki direnç. 10^6 ve $5 \times 10^8 \Omega$ arasında konuşlanmış, ‘0’ durumlarını temsil eden geçitlerin dirençleri, çizimin alt yarısında gösterilmiştir. ‘1’ durumlarını temsil eden $>4 \times 10^9 \Omega$ olan geçitlerin dirençleri diyagramın üst yarısında gösterilmişlerdir. Her geçitteki bit durumu ‘0’ veya ‘1’le gösterilmiştir.

Aynı moleküllerden ve aynı teknikle üretilen tekil ızgara tel aletleri üzerine önceki çalışmalardan, eşik değerinin üzerinde pozitif voltaj uygulandığında yüksek

dirençten alçak dirence sert bir geçiş gösterir. Şekil 5.5.(b)'de işaret değişimi gösterilmiştir. Aslında anahtar ikili değildir. Hatta birleşimin direnci, artan büyüklüklerdeki voltaj değeriyle sürekli olarak ayarlanabilirler. İstatiksel olarak, test edilmiş 8×8 sürgü devrelerinin arasında, %85' i iletim özelliği göstermişlerdir. Dirençleri $<10^5 \Omega$ olan geri kalanlar ya kısa devre yapmışlar (nano tellere kıyasla) ya da (>7 V) yüksek yazma uygulanmasına rağmen değişmeden kalanlar ise direnci $>10^9 \Omega$ olanlarda açık olmuşlardır.

Bir nanoölçekli bellek ve uygun kontrol ünitesi arasındaki gerekli yüz genelde bir multiplexer yada demultiplexerdir. Mantık devreleri sinyalleri çoğul girdi tellerinden tekil çıktı teline çevirmek ve seçmek için bir adres kodu kullanabilirler (tekil giriş telinden çoğul çıkış teline).

Özet olarak, rotaksane' ın tekil katmanından yapılan nano ölçekli moleküllü ızgara tel devrelerinin ultra-yoğunluklu bellek olarak fonkiyon gösterebileceği ve demultiplexer / multiplexer bellek ile entegre edilmiş mantığın uygulaması olduğu gösterilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Nano bilim ve nanoteknolojide araştırma çalışmaları çok çeşitli alanlarda sürdürülmektedir. Günümüzde her bilim dalı ve her teknoloji alanında nano ölçekteki boyutlarda olabilecek sıra dışı özelliklerin ortaya çıkarılması ve yeni bir teknoloji ürününde kullanabilmesi için hayalleri zorlayan yöntemler keşfetmektedir. Karbon nanotüplerin otomobil lastiklerinde kullanılmasıyla, çelikten elde edilen dayanıklılığın ve güvenilirliğin çok daha fazlasının elde edilmesi beklenmektedir. Viral RNA ve DNA'dan yapılan nanorobotlar yakıt olarak kimyasal bileşenleri kullanarak, hücre içindeki zararlı virüs saldırmaktadır. Diğer yandan genetik yapısıyla oynanan virüsler, kuantum noktalarını mükemmel olarak dizebilen kölelere dönüştürülmektedir. Bir başka alanda ise, nanoteknoloji kullanılarak kuantum bilgisayarlarının işlemcilerini geliştirmek için uğraş verilmektedir. Böylece mevcut en hızlı bilgisayarlardan binlerce kat daha hızlı bilgisayarların yapılması planlanmaktadır.

Maddenin yapıtaşı atomlar olduğuna göre, düşünülebilecek en ince nano tel tek sıra atomların dizilimiyle oluşturulabilir! Tam anlamıyla tek boyutlu bir sistem olan bu 'atom zinciri' biçimindeki nano telleri, son yıllarda laboratuvar ortamında da oluşturup özelliklerini deneysel olarak ölçmek mümkün olmuş ve bu yapılar 'kuramsal bir kurgu' olmaktan çıkmıştır. 90'lı yılların sonlarında altın nano teller ve asılı atom zincirleri oluşturup iletkenliklerini ölçerek bu alanda bir çığır açılmıştır.

Elektronik devrelerin ölçüleri günden güne küçüldüğünden, çok da uzak olmayan bir gelecekte, teknoloji kuantum fiziğinin sınırlarına dayanacaktır. O aşamada, elektron, ısı ve entropi taşınımında kuantum etkileri gösteren nanoteller, önemli ve yararlı roller oynayacaktır. Ünlü fizikçi Richard Feynman'ın, 1959 yılında yaptığı ve günümüzde hızla gelişmekte olan nanoteknolojinin müjdecisi sayılan konuşmasında öngördüğü ve bu çalışmada bahsedildiği gibi nanotellerin iletkenlik özellikleri nedeni ile minyatürizasyonda daha pek çok şaşırtıcı ve heyecanlandırıcı gelişmeler yaşanacaktır.

Son derece küçük boyutları nedeniyle, moleküler elektronik lojik yapılar çok geniş ölçekli dijital elektronik devre elemanlarının yoğunlaşmasının, geleneksel silikon tabanlı devrelerin sağladığı limitlerin ötesinde büyük bir artışa imkan verebilir. Bu durumda, bu gibi ultra-yüksek-yoğunluklu moleküler devreler, geleneksel boyuttaki mikroişlemcilerin gücünü artırmada yararlı olabilir. Böylece tek parça yeni masaüstü süper bilgisayarlar yapılabilir ve yeni uygulamalara yeni ufuklar açılabilir.

Ultra-yüksek moleküler devrenin, bir bilgisayar tarafından işgal edilen alan ve hacmin küçültülmesinin mümkün olmasıyla geleneksel bir Pentium çipine göre daha büyük bir etkisi olacaktır. Pentium mikroişlemci gibi tam bir uygulama alanının toplu iğne başı kadar olacağı tahmin edilmektedir. Bu gibi bilgisayarlarda gerekli olan elektriksel güç de, konvansiyonel bilgisayarlara göre daha az olacak ve daha küçük, daha hafif taşınabilir cihazları yapma imkanı olacaktır. Hatta mikro sensörlerde ve henüz gelişmeye başlayan milimetre ölçekli robotlarda beyin gibi kontrol edici mekanizma olarak kullanılabileceklerdir.

Geleneksel görüşe göre, Moore Kuralı'nın yoğunlukta talep ettiği gelişmeye bağlı olarak, bilgisayar işlemcisi yapmak için bir santimetre ölçekli silikon katı bloğunun içine bir trilyon parçacığın konulmasını önerir. Bu, teknoloji ve bilimdeki şu ana kadar ya da geçmişteki katı hal elektronik malzemelerinin aşırı fiziksel sınırlamalarını arttıracaktır. Moleküler elektronik araştırmacılarının, moleküler ölçekli yeni malzemeleri geliştirme ve uygulamadaki son zamanlardaki başarıları, günümüz malzeme neslini geliştirmek için aşırılıklara gerek olmayabileceğini belirtilmektedir. Doğal nano ölçekli moleküler teller ve anahtarların silikona göre elektriksel olarak işlem yapabilme performansları olduğu ve kimyasal olarak trilyonun trilyonu kadar ucuz oldukları görülmektedir. Ayrıca, küçük işlemsel bilgisayar mantık ve hafıza devrelerine nanoelektronikteki ucuz kimyasal yöntemler kullanılarak kendiliğinden düzenlenebilirler. Bunun sonucunda, laboratuarlardaki Moleküler elektronik araştırmacılarının yaptıkları gelişmeler, yakında hem bu moleküler-ölçekli elektronik devrelerinin gelişmelerini, hem de onların ultra yoğunluklu bilgisayar sistemlerine entegrelerini sağlayacaktır. Gelecekte kullanım

için gerçekleştirilen yukarıdaki sistemlerin bu prototipleri Moore Kuralı'nın uygulanmayacağına dair sözü yalnızca çürütmekle kalmayarak aynı zamanda bu çalışmaların sonuçları görülecektir. Sonuç olarak, öncül nano yapıları elektroniklerin imali için geliştirilen teknikler, tüm ürün ve malzemelerin daha geniş olarak devrimleştirilmesinde benzer olarak uygulanabilir.

Bu tez çalışmasında, moleküler cihaz ve nano ölçekli malzemelerin (moleküler teller, moleküler transistörler, moleküler doğrultucular, fabrikasyon teknikleri, vs) ustalıkla yönetilmeleri, birleştirilmeleri ve bunların devre yapılarına uygulanmaları konusunda da birçok çalışma yapılması gerekliliği görülmektedir. Ülkemizde, nanoteknoloji araştırma sahalarında çalışmalara hız vermeli ve hali hazırda dünyanın dört bir tarafında büyük bir yarışın içinde olan nano dünyasında bir an önce yerimizi almamız gerekmektedir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Nanobilim Ve Nanoteknoloji Stratejileri Vizyon 2023 Projesi Nanoteknoloji Strateji Grubu <http://vizyon2023.tubitak.gov.tr/stratejikteknoloji/nano.pdf> (2004).
2. İnternet: Kuantum Mekaniği Schrödinger Denklemi http://kuantum_x.sitemynet.com/page3.html (2005).
3. Feynman, R., “American Physical Society” at the *California Institute of Technology*, U.S.A. 111: 133–157 (1959).
4. İnternet: Karadaş, F. Supramoleküler Kimya <http://www.kimyasanal.net/index.php?is=konular&kategori=darasi&k1=polimer&k2=genel> (2003).
5. Fu, L., Cao, L., Liu, Y., Zhu, D., “Molecular and nanoscale materials and devices in electronics” *Advances in Colloid and Interface Science* 111: 133–157 (2004).
6. Çıracı, S., Özbay, E., Gülseren, O., Demir, H.V., Bayındır, M., Oral, A., Senger, T., Aydın, A., Dana, A., Ağustos "Türkiye'de Nanoteknoloji" *Bilim Ve Teknik Dergisi* 453: 6-7 (2005).
7. İnternet: Malzeme Teknolojileri Stratejisi Vizyon 2023 Projesi Malzeme Teknolojileri Strateji Grubu <http://vizyon2023.tubitak.gov.tr/stratejikteknoloji/malzeme.pdf> (2004)
8. Ellenbogen, J.C., Ph.D., “A Brief Overview of Nanoelectronic Devices” *To be presented at the 1998 Government Microelectronics Applications Conference (GOMAC98) Arlington, VA*, (1998)
9. Brar, B. ve grubu, "High Speed A/D Converters Based on Resonant Tunneling Technology," *Proceedings of the 1998 Government Microelectronics Conference (GOMAC98)*, Arlington, VA, (1998).
10. S.Kulkarni and P. Mazumder, "Full Adder Circuit Using RTDs and MOSFETs," *Proceedings of the 1998 Government Microelectronics Conference (GOMAC98)*, Arlington, VA, (1998).
11. Bumm, L.A., "Are Single Molecular Wires Conducting?" *Science* 271:1705-1707 (1996)
12. Tour, J. "Chemical Synthesis of Molecular Electronic Devices," *Presentation at the 1997 DARPA ULTRA Review Conference*, Santa Fe, NM, (1997).
13. M. Reed, "Self-Assembly-Based Approaches to Microelectronic Fabrication and Devices", *Presentation at the 1997 DARPA ULTRA Review Conference*, Santa

Fe, NM, (1997).

14. Metzger, R.M. "Unimolecular Electrical Rectification in Hexadecylquinolinium Tricyanoquinodimethanide", *J. Am. Chem. Soc.* 28: 183-257 (1997).
15. Joachim, C. and Gimzewski, J. "An Electromechanical Amplifier Using A Single Molecule," *Chem. Phys. Lett.*, 265: 353-357 (1997).
16. Tans, S. J., Verschueren, A.R.M. and Dekker, C. "Single nanotube-molecule transistor at room temperature," submitted to *Nature*, (1998)
17. J. C. Ellenbogen and J. C. Love, "Architectures for molecular electronic computers: 1. Logic structures using molecular electronic diodes," *Manuscript in preparation*, (1999)
18. J. C. Ellenbogen and J. C. Love, "Architectures for molecular electronic computers: 2. Logic structures using molecular electronic FETs," *Manuscript in preparation*, (1999)
19. Carroll, R.L, Gorman, C.B., "Molecular Logic Units", *Angew Chem Int Ed*; 41:4378 (2002).
20. Kuekes, P. J., Williams, R. S. and Heath, J. R, Hewlett-Packard Development Co., L.P., Houston, TXUSA, "Molecular-wire crossbar interconnect (MWCI) for signal routing and communications,"USA, Patent No. 6 314 019 (2001).
21. Zwolak, M.P., Zallen, R. and Di Ventra, M. "Percolation study of defect tolerance in missing-crossbar networks," *Solid State Commun.*, 124: 167–170 (2002).
22. Husband, C. P, Husband, S. M., Daniels, J. S and Tour, J. M. "Logic and memory with nanocell circuits," *IEEE Trans. Electron Devices*, 50: 9: 1865–1875 (2003)
23. Seminario, J. M. and Cordova, L.E. "Toward multiple-valued configurable random molecular logic units," in *Proc. IEEE Nanotechnology Conf*, 1: 146–150 (2001).
24. Aviram, A., Joachim, C., "Molecular Logic Units" *Chem Phys Lett*, 29: 277 (1974).
25. Aviram, A., Joachim, C., Pomerantz, M., "Molecular Logic Units" *Chem Phys Lett*, 146: 490 (1988).
26. Ashwell, G.J., Sambles, J.R., Martin, A.S., Parker, W.G., Szablewski, M., "Molecular Logic Units" *Chem Commun*, 19:1374 (1990).

27. Ashwell, G.J, Dawnay, E.J.C, Kuczynski, A.P., “Molecular Logic Units” **Chem Commun**, 19: 1355 (1990).
28. Metzger, R.M., Chen, B., Hopfner, U., Lakshmikantham, M.V., Vuillaume,T., Kawai ,T., et al. J., **Am Chem Soc**, 119: 10455 (1997).
29. Mizuseki, H., and Kawazoe Y. Molecular Scale Rectifier: Theoretical Study Chiranjib Majumder **J. Phys. Chem. A**, 105: 9454–9459 (2001)
30. Ellenbogen, J. C.; Love, J. C., “Architectures for Molecular Electronic Computers: 1. Logic Structures and an Adder Designed from Molecular Electronic Diodes.”, **Proc. IEEE**, 88: 386–426 (2000).
31. Matter, “Atomic-scale nanowires: physical and electronic structure” **J. Phys.: Condens.**, 16 R721–R754 PII: S0953–8984(04)52597–3 (2004)
32. Dembinski, R., Bartik T., Bartik, B., Jaeger, M, Gladysz, J.A., **J. Am. Chem. Soc.**, 122: 810 (2000).
33. Barigeletti F, Flamigni L., “Atomic-scale nanowires: physical and electronic structure”, **Chem Soc Rev**, 29:1 (2000).
34. Crossley, M.J., Burn, P.L., “Atomic-scale nanowires: physical and electronic structure”, **Chem. Commun.**, 1987: 39 (1987).
35. Crossley ,M.J., Burn ,P.L., “Atomic-scale nanowires: physical and electronic structure” **Chem. Commun.**, 1991: 1569 (1991).
36. Mazur, U., Hipps, K.W., “Atomic-scale nanowires: physical and electronic structure” , **J. Phys. Chem.**, B 1999; 103: 9721 (1999).
37. Pablo PJ, Go´mez-Navarro C, Mart´y´nez MT, Benito AM, Maser J, Colchero J, **Appl. Phys. Lett.**, 80: 1462 (2002).
38. Çıracı, S., Ağustos “Metrenin bir milyarda birinde bilim ve teknoloji” **Bilim ve Teknik Dergisi**, 453: 8 (2005).
39. Bachtold, A., Henny, M., Tarrier, C., Strunk, C., Schonenberger, C., Salvetat, J.P, **Appl. Phys. Lett.**, 73: 274 (1998).
40. De Pablo, P., J., Gomez - Navarro, C., Gil, A., Colchero, J., Martinez, M., T., Benito, A.M., **Appl. Phys. Lett.**, 79: 2979 (2001).
41. Storm, A.J., Van Noort ,J., De Vries ,S., Dekker ,C., **Appl. Phys. Lett.**, 79: 3881 (2001).
42. Tans, S.,J., Verschueren, A.R.M., Dekker ,C., **Nature**, 393: 49 (1998).

43. Wang, D., Wang, Q., Javey, A., Tu, R., Dai, H.J., **Appl. Phys. Lett.**, 83: 2432 (2003).
44. Fu, L., Liu, Y.Q., Hu, P.A., Xiao, K., Yu, G., Zhu, D.B., **Chem. Mater.**, 15: 4287 (2003).
45. Sato, T., Ahmed, H., Brown, D., Johnson, B.F.G. J., **Appl. Phys.**, 82: 696 (1997).
46. Tanaka, K. S., Yamanaka, T., Koike and Yamabe, T., **Phys. Rev.**, B32 2731 (1985).
47. Hye-Mi Soa, Jinhee Kimb, Wan Soo Yunb; Jong Wan Parka, Ju-Jin Kima, Do-Jae Wonc, Yongku Kangc, Changjin Leec, “Molecule-based single electron transistor”, **Physica E**, 18: 243 – 244 (2003).
48. Zhong, Z., Wang, D., Cui, Y., Bockrath, M.W., Lieber, C.M., **Science**; 302: 1377 (2003).
49. Alexandrov, A.S., A.M. Bratkovsky & R. Stanley Williams. “Bistable tunneling current through a molecular quantum dot”. **Phys. Rev.**, B 67: 075301 (2003).
50. Luo, Y., *et al.* “Two-dimensional molecular electronics circuits”. **Chem. Phys. Chem.**, 3: 519–525 (2002).
51. Moresco, F., *et al.* “Conformational changes of single molecules induced by scanning tunneling microscopy manipulation: a route to molecular switching.” **Phys. Rev. Lett.**, 86: 672–675 (2001).
52. Emberly, E.G., & Kirczenow G., “The smallest molecular switch”. **Phys. Rev. Lett.**, 91: 188301 (2003).
53. Kornilovitch, P.E. & A.M. Bratkovsky.. “Orientational dependence of current through molecular films”. **Phys. Rev.**, B 64: 195413 (2001).
54. Chen, J., Reed, M.A., Rawlett, A.M., Tour, J.M., **Science**; 286: 1550(1999).
55. Reed, M.A., Chen, J., Rawlett, A.M., Price, D.W., Tour, J.M., **Appl. Phys. Lett.**, 78: 3735 (2001).
56. Tsumura, A., Koezuka, M., Ando, T., **Appl. Phys. Lett.**, 49: 1210 (1986).
57. Garneir, F., Hajlaoui, R., Yassar, A., Srivastava, P., **Science**, 265: 1684 (1994).
58. Yang, Y., Heeger, A.J., **Nature**, 372: 344 (1994).
59. Burn, P.L., Bradley, D.D.C., Brown, A.R., Friend, R.H., Holmes, A.B., **Synth.**

- Met.**, 261: 41–43 (1991).
60. Kahn, O., Jay Martinez, C., **Science.**, 279: 44 (1998).
 61. Collins, P. G., and Avouris, P., “Nanotubes for electronics,” **Sci. Amer.**, 283: 38–45 (2000).
 62. Wildoer, J. W., Venema, L. C., Rinzler, A. G., Smalley, R. E., and Dekker, C., “Electronic structure of atomically-resolved carbon nanotubes,” **Nature**, 391: 59–62 (2001).
 63. Appenzeller, J., Martel, R., Avouris, P., Stahl, H., Lengeler, B., “Optimized contact configuration for the study of transport phenomena in ropes of single-wall carbon nanotubes,” **Appl. Phys. Lett.**, 78: 3313–3315 (2001).
 64. Zhong, Z., Wang, D., Cui, Y., Bockrath, M.W., Lieber, C.M., **Science**, 302: 1377 (2003).
 65. Keren, K., Berman, R.S., Buchstab, E., Sivan, U., Braun, E., **Science**, 302: 1380 (2003).

EKLER

EK-1

NANOELEKTRONİK CİHAZLARIN GENEL KARŞILAŞTIRMALARI

Nanoelektronik cihazlar silikon teknolojisi ve günümüz malzemelerine çok farklı alternatifler sunmuştur. Fakat boyutlarının minyatürizasyonu ve fabrikasyonu gibi bir çok sorun henüz aşılamamıştır. Aşağıda bir takım nanoelektronik cihazın karşılaştırmaları verilmiştir.

Çizelge Ek.1.1. Nanoelektronik cihazların genel karşılaştırmaları

ELEMAN	DURUMU	AVANTAJI	DEZAVANTAJI
RTD	Büyük ölçekte üretim yapılabilir	Mantıksal karşılaştırma yarı-iletken esastır	Küçültmedeki limitler-mikroelektroniklere benzer
SET	Sadece çok düşük sıcaklıkta çalışır	Yüksek kazançlı çalışma	Düşük sıcaklık Kontrolü zor
QD HÜCRELERİ	Teorik olarak QD ve QD hücreleri üretilebilir	İletken tele gerek yok Düşük enerji harcaması	Zor tasarım kuralları Gürültüden kolay etkilenir
MOLEKÜLER MEKİK ANAHTAR	Deneysel, sadece kimyasal anahtarlama yapılabilir	Küçük ve sağlam	Düşük anahtarlama hızı Nasıl bağlanacak? (Self-Asembly)
ATOM RÖLESİ	Teorik	Çok hızlı Nanometre ölçeğinde	Çok güvenilirmez
SAFLAŞTIRILMIŞ MOLEKÜLER RÖLE	Teorik	Nanometre ölçeğinde Atom rölesinden daha güvenilir	Nasıl üretilecek ?

EK-2

MOLEKÜLER ELEKTRONİK CİHAZLARIN AKIM YOĞUNLUĞU

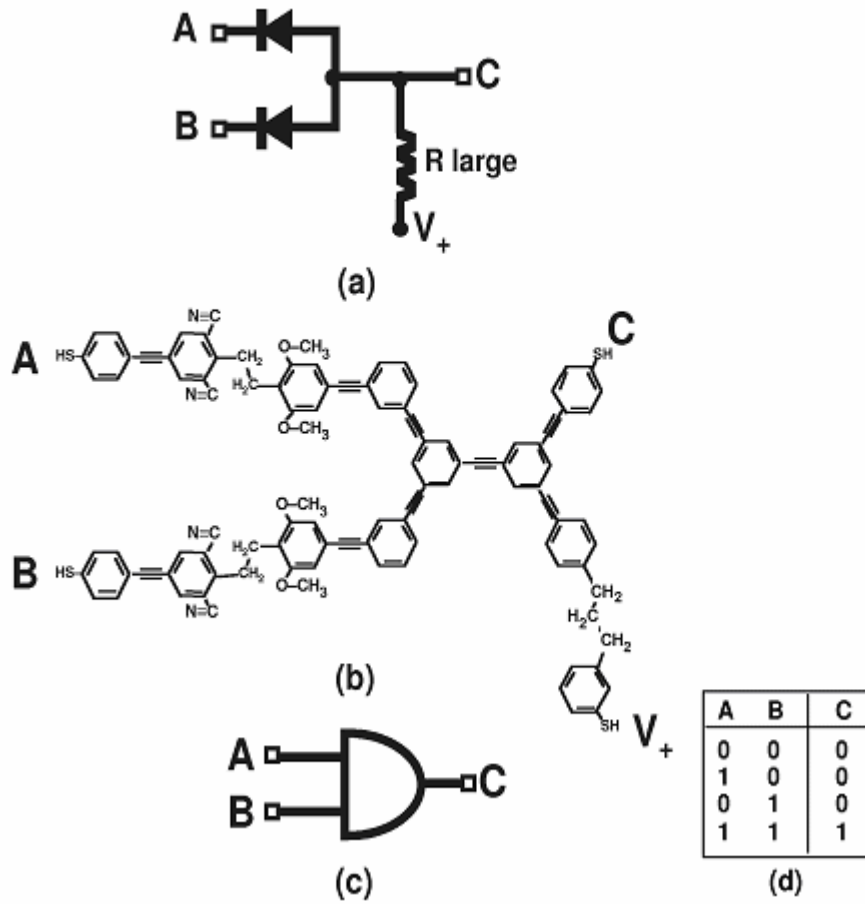
Aşağıda farklı moleküler yapıların ve moleküler iletkenlerin özellikleri verilmiştir. Bu moleküller, son zamanlarda doğrultmaç diyotların özelliklerini araştıran Metzger tarafından bulunmuştur. Mikroskobik metal cihazlardan ve moleküler elektronik yapılardan elde edilen deneysel hesaplamalar. (Nanometre karede bir saniyedeki yaklaşık akım yoğunlukları)

Çizelge Ek.2.1. Moleküler Elektronik Cihazlar

MİKTAR	BİRİMLER	1,4-Dithiol Benzen	Polipenilen Tel (3Halka)	Polipenilen RTD (5 halka)	Karbon Nanotüp	Bakır Tel
Uygulanan Voltaj	Volt	1	1	1.4 (peak)	1	2×10^{-3} (10cm tel)
Deneydeki Akım Değeri	Amper	2×10^{-8}	3.2×10^{-5}	1.4×10^{-11}	1×10^{-7}	1 (yaklaşık)
Molekül Başına Akım	Amper Saniyedeki elektron	2×10^{-8} 1.2×10^{11}	3.2×10^{-8} 2.0×10^{11}	1.4×10^{-14} 8.7×10^4	1×10^{-7} 6.2×10^{11}	- -
Molekül Başına Tahmini Çapraz Bölge Alanı	nm ²	~0.05	~0.05	~ 3.1×10^{12} (Yançap ≈1 nm)	~3.1 (Yançap ≈1 nm)	
Akım Yoğunluğu	Electrons per Sec-nm ²	~ 2×10^{12}	~ 4×10^{12}	~ 2×10^6	~ 2×10^{11}	~ 2×10^6

EK-3

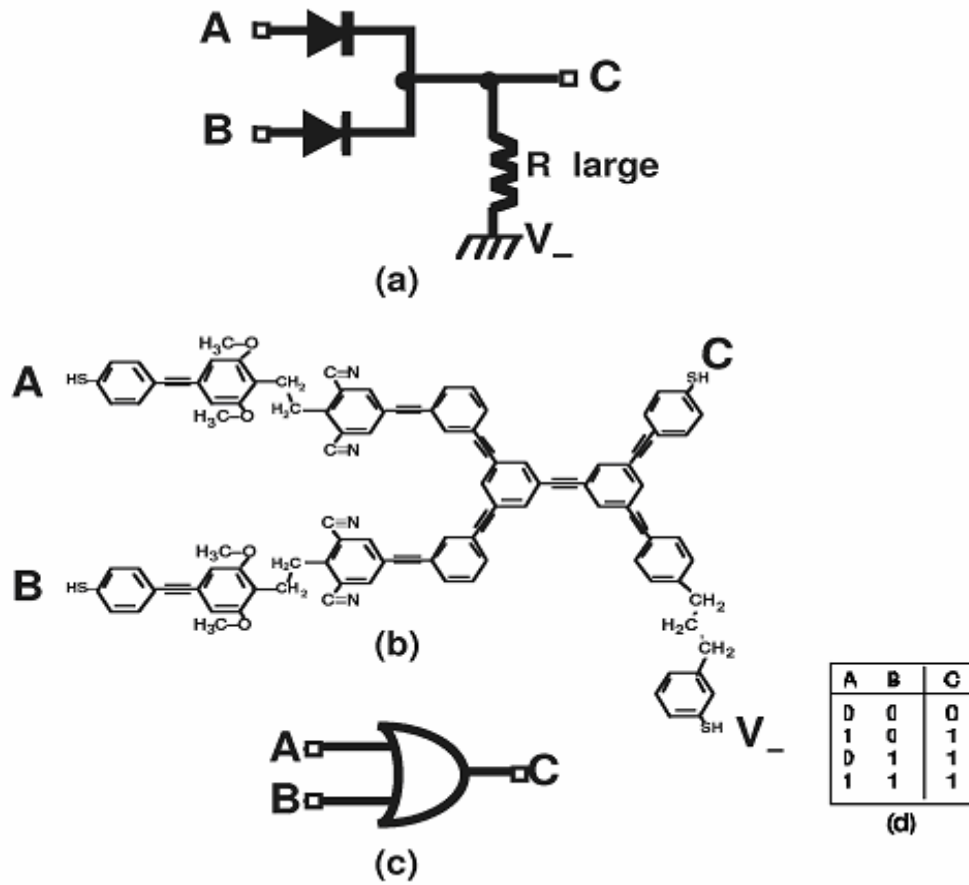
DİYOT-DİYOT TİP MOLEKÜLER ELEKTRONİK AND KAPISI



Şekil Ek.3.1 Tour tellerine sokulmuş polipenilen tabanlı moleküler doğrultmaç diyotlarla birleştirilmiş Diyot-Diyot tip moleküler elektronik AND kapısı

EK-4

DİYOT-DİYOT TİP MOLEKÜLER ELEKTRONİK OR KAPISI

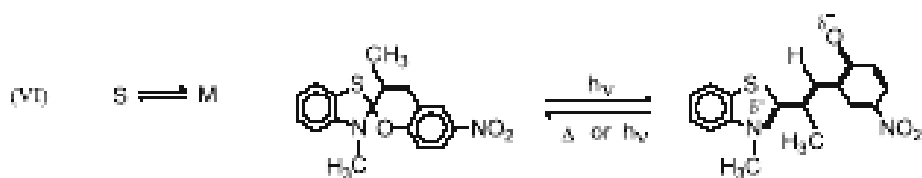
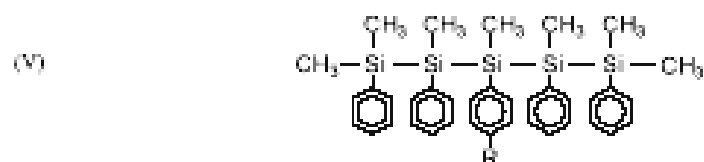


Şekil Ek.4.1 Tour tellerine sokulmuş polipenilen tabanlı moleküler doğrultmaç diyotlarla birleştirilmiş Diyot-Diyot tip moleküler elektronik OR kapısı

EK-5

MOLEKÜLER ANAHTARLAR İÇİN KULLANILAN MOLEKÜLLER

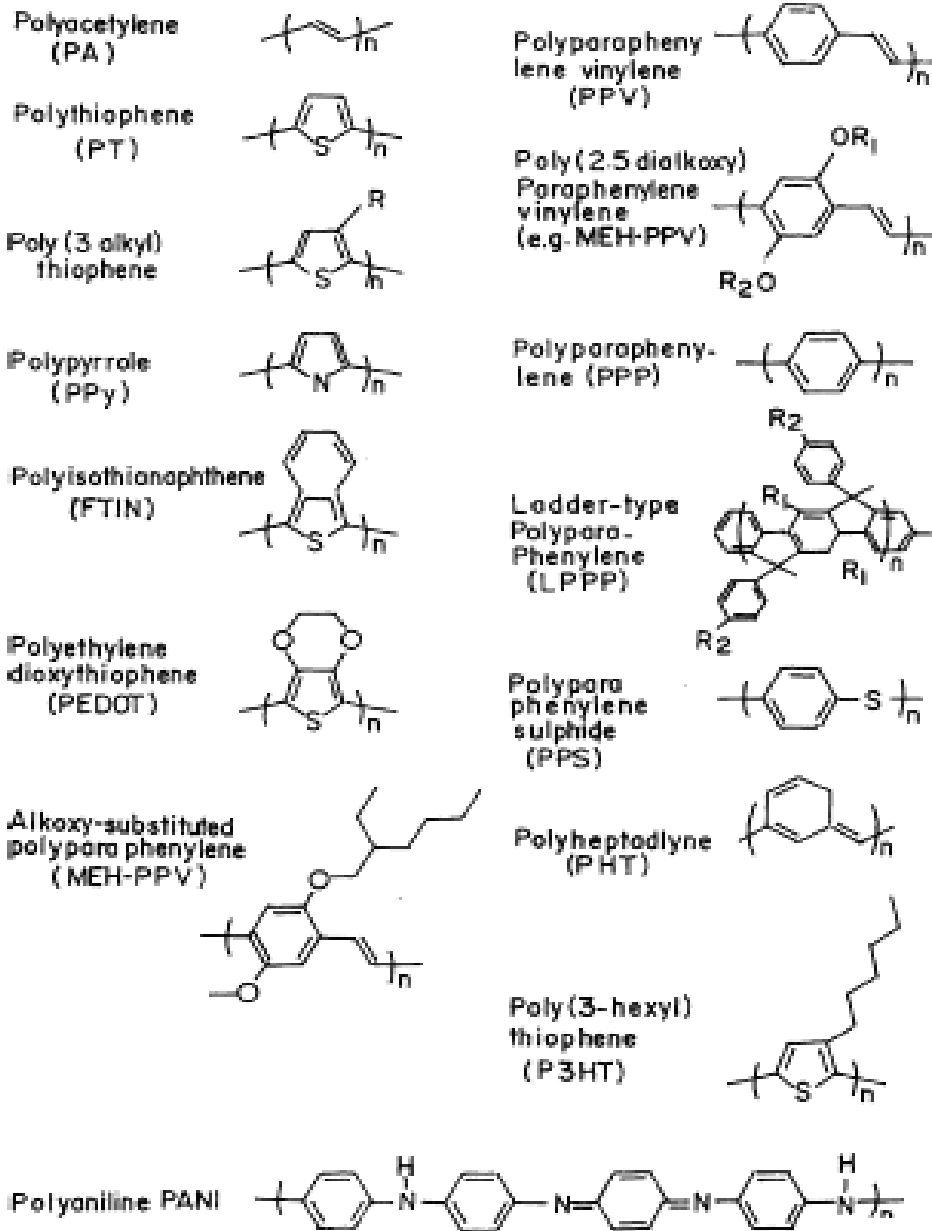
Yakın zamanda Chen ve grubu, iki adımlı indirgeme süreci üzerine kurulu yeni bir moleküler anahtar önermişlerdir(40). Bu anahtar, fotokromik yarımaları içeren kenar gruplarına uygun bir biçimde bağlı moleküler bağdan oluşmaktadır. Aşağıda moleküler bağ gibi davranan konjuge polimer zincirinin parçaları verilmiştir.



EK-6.

İLETKEN POLİMER YAPILARI

Koezuka ve grubu tarafından üretilen polimer temelli transistor de kullanılan ve daha sonra bu alanda farklı kişilerce de çalışılan polimerler ve bu moleküllerin iletkenlik özellikleri aşağıda verilmiştir.



ÖZGEÇMİŞ

Beyza ALCAN, 1980 yılında Adana’da doğdu. Adana Merkez Teknik Lisesi Elektronik Bölümünde lise öğrenimini tamamladı. 1998 yılında, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Elektronik Öğretmenliği Bölümünü kazandı. 2002 yılında lisans eğitimini tamamladı. Halen, Ankara Ulus Endüstri Meslek Lisesi’nde Bilgisayar öğretmeni olarak görev yapan Beyza ALCAN, evli ve bir çocuk sahibidir.