

ESTADO DEL ARTE DE LA NANOTECNOLOGIA Y SU APLICACIÓN EN LAS
TELECOMUNICACIONES

JORGE HUMBERTO FLOREZ BALLESTEROS
HERNANDO BARRIOS GARCIA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
POSTGRADOS EN TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2009

ESTADO DEL ARTE DE LA NANOTECNOLOGIA Y SU APLICACIÓN EN LAS
TELECOMUNICACIONES

JORGE HUMBERTO FLOREZ BALLESTEROS
HERNANDO BARRIOS

Director
Dr. John Jairo Padilla

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
POSTGRADOS EN TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2009

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 5 de Diciembre de 2008

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
LISTA DE TABLAS.....	I
LISTA DE FIGURAS.....	II
RESUMEN.....	IV
SUMMARY.....	V
 1. INTRODUCCIÓN.....	 7
1.1. Características Fundamentales.....	8
1.2. Aplicaciones potenciales.....	9
1.3. Impacto Tecnológico y comercial.....	11
1.3.1. Tecnológico.....	11
1.3.2. Comercial.....	15
 2. FUNDAMENTOS BÁSICOS.....	 17
2.1. Teoría Fundamental.....	17
2.2. Propiedades físicas de los materiales.....	20
2.3. Propiedades químicas de los materiales.....	21
2.4. Compuestos.....	22
2.5. Propiedades básicas de los conductores, aisladores y semiconductores.....	23
2.6. Propiedades básicas del silicio y operación básica de los transistores.....	25
2.7. Transistor.....	25
2.8. Limitaciones de Fabricación.....	28
 3. NANOESTRUCTURAS BÁSICAS.....	 29
3.1. Propiedades de la Nanopartícula y el Efecto del Tamaño.....	30
3.1.1. Propiedades Morfológicas/Estructurales.....	30
3.1.2. Propiedades Térmicas.....	30
3.1.3. Propiedades Electromagnéticas.....	31
3.1.4. Propiedades Ópticas.....	32
3.1.5. Propiedades Mecánicas.....	32
3.2. Nanoestructuras.....	32
3.2.1. Nanotubos de Carbono.....	32
3.2.2. Emisión de Campo y Blindaje.....	36
3.2.3. Computadores.....	36
3.2.4. Celdas de Combustibles.....	37
3.2.5. Sensores Químicos.....	37
3.2.6. Nanoalambres.....	37
3.2.7. Nanoconos.....	38
3.2.8. Puntos Cuánticos.....	39

3.2.9. Diamantes Ultracristalino.....	41
	pág.
3.2.10. Nanodiamantes (Diamondoids).....	42
3.2.11. Películas Delgadas.....	42
3.2.12. Nanoespuma.....	43
3.2.13. Nanocluster.....	43
4. GENERALIDADES DE LA NANO ELECTRÓNICA.....	43
4.1. Dispositivos Simple Electrón.....	44
4.2. Dispositivos Mecánicos del Túnel Cuántico.....	46
4.3. Nanoelectrónica SPIN (Spintronics).....	48
4.4. Nanoelectrónica Molecular.....	50
4.5. Tolerancias a Fallo de Diseño.....	53
4.6. Cuántica Automata Celular.....	54
4.7. Computación Cuántica.....	55
5. GENERALIDADES DE LA NANOFOTÓNICA.....	57
5.1. La Fotónica.....	57
5.2. Naturaleza de la Nanofotónica.....	61
6. APLICACIONES EN LAS TELECOMUNICACIONES.....	67
6.1. Láseres de Cascada Cuántica.....	67
6.2. Fibra de Cristal Fotónico.....	68
6.3. Nanoredes.....	69
6.3.1. La comunicación entre nanomáquinas.....	70
6.3.2. Nanoredes versus Redes tradicionales.....	71
6.3.3. Componentes de una nanored.....	73
6.3.4. Comunicación usando motores moleculares.....	76
6.3.5. Comunicación usando señalización de calcio.....	77
6.4. MONA (Merging Optics and Nanotechnologies).....	78
6.4.1. Materiales Claves Para la Fotónica.....	82
6.4.2. Impacto de los Nanomateriales.....	84
6.4.3. Síntesis del Reporte para las Telecomunicaciones.....	85
7. CONCLUSIONES.....	87
8. BIBLIOGRAFÍA.....	89
9. ANEXOS: Terminología clave.....	97

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.1 Concentración de la Investigación.....	12
Tabla 1.2. Disciplinas y Subdisciplinas de la Nanotecnología.....	13
Tabla 1.3. Disciplinas y Subdisciplinas de la Nanotecnología.....	14
Tabla 6.1. Diferencias principales entre las redes de comunicación tradicionales y.....	69
las nano redes que utilizan comunicación molecular.	
Tabla 6.2. . Aparición de los dispositivos basados en nanofotónica en 2011 y 2015.....	76

LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Evolución de varias disciplinas hacia la Nanotecnología.....	7
Figura 1.1ª Tamaño de algunos objetos naturales y hechos por el hombre.....	8
Figura 1.1b Tamaño de algunos objetos naturales y hechos por el hombre.....	8
Figura 1.2. Investigación en Nanotecnología.....	15
Figura 1.3. Investigación en Nanotecnología en Universidades de los Estados Unidos.....	16
Figura 2. Composición de un átomo.	17
Figura 2.1. Escala algunas entidades atómicas.....	19
Figura 2.2. Algunas metáforas con las distancias atómicas.....	19
Figura 2.3. Nomenclatura.....	21
Figura 2.4. Transistor de efecto de campo.....	26
Figura 2.5. DRAM y memoria Flash.....	27
Figura 2.6. Rendimiento vs Resolución de varias técnicas litográficas.....	29
Figura 3. Nanotubos de carbono de pared única.....	34
Figura 3.1. Características de los SWNT.....	35
Figura 3.2. Nanocuerdas.....	38
Figura 3.3. Nanoconos.....	39
Figura 3.4. Punto Cuántico.....	40
Figura 4.1 Ejemplo de un Transistor Simple – Electrón.....	45
Figura. 4.2 Vista clásica de un electrón.....	47
Figura 4.3 Parámetros de la RTD.....	48
Figura 4.4. Híbrido complementario de óxido metálico semiconductor/ Circuito Molecular.....	50
Figura 4.5. Una matriz nanoalambre de molécula e interrumpida después por contactos con las células de Semiconductores, forma una red distribuida travesano.....	51
Figura. 4.6 Ejemplo del diseño del árbol grueso.....	53
Figura 5. Mapa técnico que muestra el incremento en la densidad de almacenamiento de los sistemas de discos ópticos. La densidad de almacenamiento logrado por la nanofotónica.....	54
Figura 5.1. Mapa técnico que muestra los requerimientos para reducir el tamaño de los dispositivos fotónicos para sistemas de comunicaciones a corta distancia sobre fibra óptica.....	55
Figura 5.2. Mapa técnico de la reducción del ancho de línea en modelos fabricados mediante la fotolitografía. También se muestran los nombres de las fuentes de luz y la capacidad de las DRAM. Las siglas EUV y SR significan luz ultravioleta y radiación síncrona respectivamente. El ancho de línea alcanzado por la nanofotónica.....	57
Figura 5.3. Nanofotónica para realizar innovación cualitativa.....	58
Figura 5.4. Sistemas híbridos de almacenamiento de alta densidad óptico-magnéticos.....	59
Figura 5.5. Dispositivos nanofotónicos y un circuito integrado.....	60

Figura 5.6. Sistema convencional de enrutamiento y su mejoramiento usando Nanofotónica.....	61
Figura 5.7. Litografía Nanofotónica. Derecha: Apariencia del sistema. Izquierda: Un escaneo con un microscopio de electrones de un patrón corrugado fabricado.....	61
Figura 6. Comparativa entre un láser convencional y un láser QC.....	63
Figura 6.1. Estructura de una fibra de cristal fotónico con revestimiento de aire.....	64
Figura 6.2. Comparación entre los sistemas tradicionales de comunicación y las nanoredes.....	70
Figura 6.3 Componentes de un sistema de comunicaciones basado en motores moleculares.....	76
Figura 6.4 Propagación de las señales en un sistema de comunicaciones basado en señalización de calcio.....	78
Figura 6.5 Instituciones y/o empresas que conforman MONA	79
Figura 6.6 Campos de aplicación de las nanotecnologías.....	80
Figura 6.7 Crecimiento del Mercado para las aplicaciones en que se enfoca la nanofotónica.....	81
Figura 6.8 Dispositivos de telecomunicaciones.....	82
Figura 6.9 Impacto técnico de los nanomateriales por aplicación.....	84
Figura 6.10 Síntesis del reporte para las Telecomunicaciones.....	85

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Estado del arte de la Nanotecnología y sus aplicaciones en las Telecomunicaciones.

AUTOR(ES): Jorge Humberto Flórez Ballesteros
Hernando Barrios García

FACULTAD: Esp. En Telecomunicaciones

DIRECTOR(A): Dr. Jhon Jairo Padilla

RESUMEN

En los últimos años los investigadores han realizado avances significativos en el campo de la Nanotecnología, que van desde la manipulación de átomos y moléculas individuales hasta la posible aplicación en diferentes campos de la ciencia. En la actualidad las grandes potencias del mundo están invirtiendo mucho dinero y tiempo en el desarrollo e investigación de los diferentes campos de la Nanotecnología, muchos de los frutos de esta inversión ya están empezando a aparecer y prometen revolucionar a la humanidad en campos que van desde la electrónica hasta la medicina. El objetivo de esta monografía es el de investigar en qué estado se encuentran los avances en la Nanotecnología y principalmente conocer las actuales y sus posibles aplicaciones en las telecomunicaciones. Para este propósito se realizó una investigación bibliográfica de un gran número de artículos y libros sobre el tema para así crear un documento donde se da a conocer de una forma general lo que se pretende con la investigación.

PALABRAS CLAVES: Nanotecnología, Nanofotónica, Nanoelectrónica, Física Cuántica, Telecomunicaciones, Fotónica, Nanoestructuras.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITLE: State of art of Nanotechnology and its applications in Telecommunications.

AUTHOR(S): Jorge Humberto Flórez Ballesteros
Hernando Barrios García

FACULTY: Esp. En Telecomunicaciones

DIRECTOR: Dr. Jhon Jairo Padilla

ABSTRACT

In recent years researchers have made significant advances in the field of nanotechnology, ranging from the manipulation of individual atoms and molecules to the possible applications in different fields of science. At present the most powerful countries in the world are investing a lot of time and money in development and research in different fields of nanotechnology, many of the results of this investment are already beginning to emerge and promise to revolutionize humanity in fields ranging from electronics to medicine. The aim of this paper was to investigate what is the present status of advances in nanotechnology and mainly learn about the current and potential applications in telecommunications. For this purpose we did a bibliography research of numerous articles and books on the subject to create a document that reveals the meaning of the investigation.

KEY WORDS: Nanotechnology, Nanophotonics, Nanoelectronics, Quantum Physics, Telecommunications, Photonics, Nanostructures.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años los investigadores han realizado avances significativos en el campo de la Nanotecnología, que van desde la manipulación de átomos y moléculas individuales hasta la posible aplicación en diferentes campos de la ciencia (ver figura 1).

El padre de la “nanociencia”, es considerado Richard Feynman, premio Nobel de Física, quién en 1959 propuso fabricar productos en base a un reordenamiento de átomos y moléculas. En 1959, el gran físico escribió un artículo que analizaba cómo los computadores podrían trabajar con átomos individual y consumir poquísima energía y conseguir velocidades asombrosas [1], aunque el término “nanotecnología” fue introducido por primera vez por Nory Taniguchi in 1974 en la Conferencia Internacional de Ingeniería de Producción en Tokio.

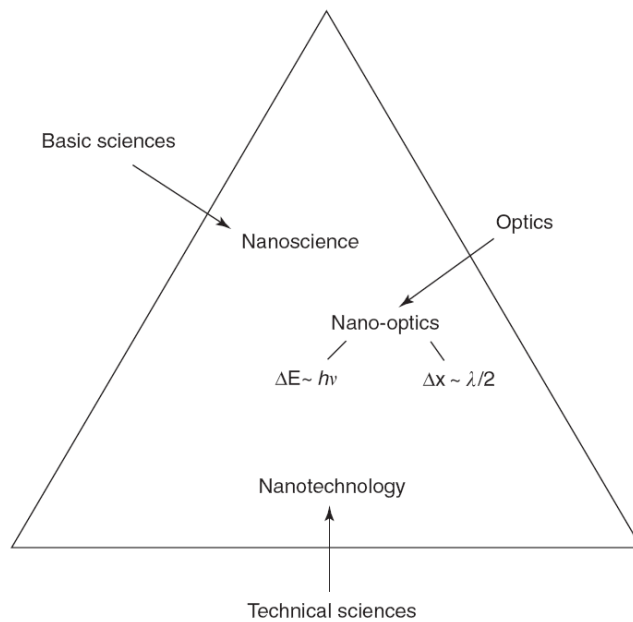


Figura 1. Evolución de varias disciplinas hacia la Nanotecnología.
Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

En 1986 K. E. Drexler basado en las ideas de Feynman introdujo en su libro *Engines of Creation* la idea de nanotecnología molecular. Drexler propuso el uso de billones de pequeñas maquinas llamadas “ensambladores o nano-maquinas” (ver figura 1.1a y 1.1b) que serían la base para construir literalmente cualquier cosa átomo por átomo, molécula por molécula.

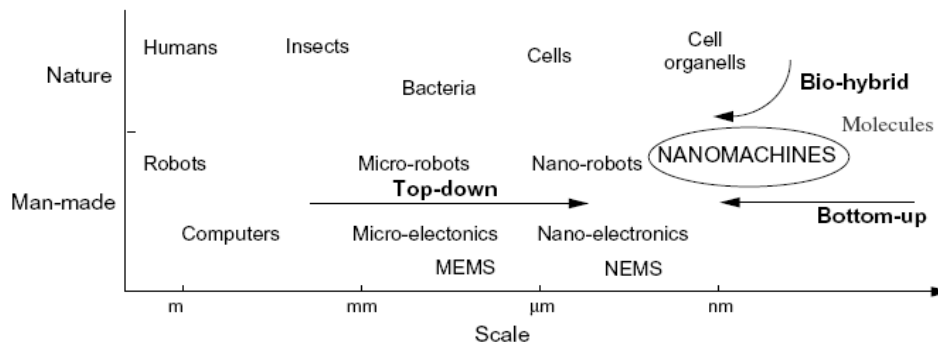


Figura 1.1a Tamaño de algunos objetos naturales y hechos por el hombre
Fuente: Nanonetworks: A new communication paradigm

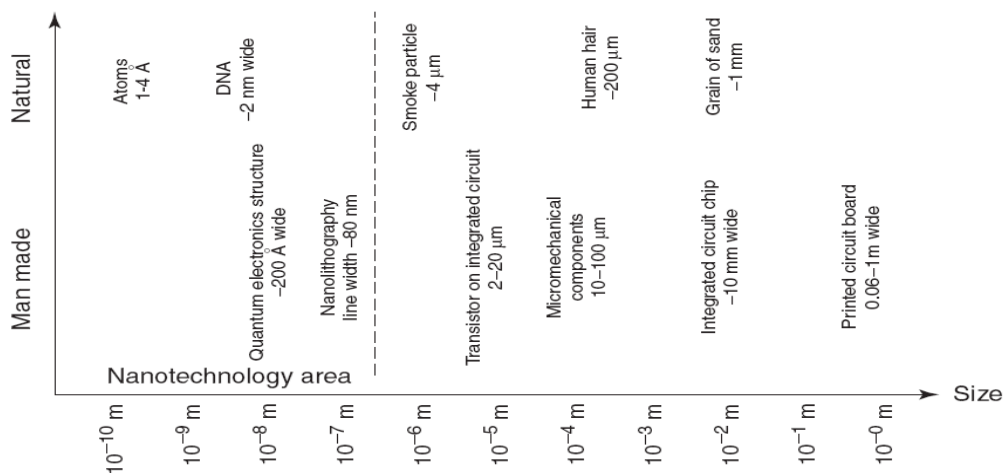


Figura 1.1b Tamaño de algunos objetos naturales y hechos por el hombre
Fuente: Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking.

1.1 Características Fundamentales

El término nano proviene del griego y significa “enano”, este término indica dimensiones físicas en el rango de 10^{-9} partes de un metro. Un nanómetro es aproximadamente el largo de dos átomos de hidrogeno, el largo de cuatro átomos de silicio, por ejemplo el núcleo de una fibra mono-modo tiene un diámetro de 10000nm y un nano-cable 10 nm de longitud es 1000 veces más pequeño que la fibra. Puede considerarse a la Nanotecnología como la construcción, el diseño y la utilización de materiales que existen a una nano-escala, en esta escala la dimensión de la mecánica cuántica es evidente en la electrónica, átomos y fotones [2].

De otra parte, todas las nano-estructuras y procesos de manufactura, como los nanocables, nanotubos, litografía de rayos de electrones, etc., están siendo implementados o se tiene planeado implementarlos en las telecomunicaciones y en dispositivos

microprocesados para llegar a sistemas de comunicaciones y computadores más poderoso y eficientes.

En la actualidad los avances en Nanotecnología ya están siendo implementados como por ejemplo los procesadores de computadores se están fabricando con tecnología de hasta 45nm; algo impresionante ya que puede integrar en un solo chip hasta 820 millones de transistores [3], o la reciente invención de una nano cinta adhesiva que es 10 veces más adhesiva que los pies de una lagartija y está fabricada a base de nanotubos de carbono [4]. Se estima que en los últimos años más de 20000 investigadores han venido trabajando en proyectos de nanotecnología. Existe una organización creada por el gobierno de los Estados Unidos para el apoyo y la creación de una visión a largo plazo de las ventajas y las oportunidades de la Nanotecnología, el NNI (*National Nanotechnology Initiative*) con un presupuesto de 1491 millones de dólares; esta institución tiene como principal objetivo liderar un proyecto de clase mundial en la investigación y el desarrollo de la nanotecnología de este modo dando la ventaja al gobierno de los Estados Unidos en este campo[5].

1.2 Aplicaciones potenciales

La Nanotecnología es catalogada como una ciencia, la cual manipula la materia a nivel nanoscópico, con el objetivo principal de sintetizar nuevos compuestos que posean ciertas propiedades de resistividad, durabilidad, maleabilidad y la semiconducción eléctrica y con un potencial increíble capaz de resolver muchos de los requerimientos actuales de la industria. Estos desarrollos a nanoescala prometen revolucionar muchos campos y dirigirnos hacia una nueva infraestructura, con una base tecnológica que puede tener su mayor impacto en las telecomunicaciones, computación y la tecnología de la información (en la forma de redes ópticas/nanofotónica, nanocomputación/nanoelectrónica, y nanoalmacenamiento); medicina y biotecnología; medio ambiente; energía; transporte; y exploración espacial, entre otras [6]. La Nanotecnología permitirá a los fabricantes producir chips de computadora y sensores que se considerarán más pequeños, rápidos, con bajo consumo de energía y de más bajo costo que los que se fabrican hoy en día. Específicamente la nanotecnología está dando nacimiento a muchas nuevas aplicaciones como son: la computación cuántica, la modificación de materiales y superficies, separaciones nuevas, tecnologías de sensores de diagnóstico y reemplazos biomédicos humanos.

Esta tecnología también abrirá completamente nuevas áreas de la investigación enfocadas al comportamiento de la materia a este nivel de escala [7]. Es decir se cree que la interacción de nuevos materiales con la biología es la nueva frontera en la nanotecnología. Por ejemplo, la NASA prevé una *zona de convergencia* entre la biotecnología, la nanotecnología y la tecnología de la información. Consecuentemente la NASA, esta fundando la Nanociencia Básica, así como el trabajo en materiales nanoestructurados, nanoelectrónica e investigación en sensores [9]. Otro ejemplo, es el ejército de los Estados Unidos, el cual se está fundamentando en la *nanotecnología de los soldados*, con el fin de desarrollar nuevos productos que reduzcan sustancialmente el peso que los soldados deben cargar en sus misiones, incrementado la protección física.

Los Nanomateriales dan un ímpetu también a nuevas aplicaciones de la tecnología, porque ellos muestran las propiedades ópticas, eléctricas, y/o magnéticas nuevas. La

primera generación de nanotecnología (finales de los 90-principios del 2000) se enfocó en mejorar el desempeño de los micromateriales existentes; la segunda generación de nanotecnología (2006-2007) empezó a emplear nanomateriales de formas diversas y radicales. Los observadores de la industria afirman que los avances en nanotecnología son esenciales, si se quiere continuar mas allá de la próxima década con la revolución del hardware para computadores; además, la nanotecnología nos permitirá fabricar una nueva generación de productos que son más limpios para el medio ambiente, fuertes, livianos, y más precisos [10]. Los Nanomateriales con características estructurales a nanoescala se pueden encontrar en forma de clusters, películas delgadas, multicapas, y materiales nanocristalinos que a menudo son expresados por la dimensionalidad de 0, 1, 2 y 3; los materiales de interés incluyen metales, aleaciones amorfas y cristalinas, semiconductores, óxidos, cerámicas de nitruro y carburo en forma de clusters, películas delgadas, multicapas, y materiales nanocristalinos [11].

Todos los productos son manufacturados a partir de átomos, sin embargo, de modo interesante, las propiedades de estos productos dependen de cómo estos átomos están arreglados. Con la nanotecnología se pueden ensamblar los bloques fundamentales naturales de construcción (átomos, moléculas, etc.), dentro de las limitaciones de las leyes de la física, de manera que no ocurrirían naturalmente o en formas de crear alguna estructura existente, mediante la síntesis de elementos que la componen. Los Nanomateriales a menudo tienen propiedades dramáticamente diferentes a las de sus contrapartes a gran escala; por ejemplo, el cobre nanocristalino es cinco veces más duro que el cobre ordinario con su estructura cristalina de micrómetros de tamaño [12]. Un objetivo de la nanotecnología es cerrar la brecha entre las estructuras fabricadas con la más pequeña litografía y las moléculas sintetizadas químicamente [13].

Mientras los ingenieros y científicos continúan empujando hacia sus límites la fabricación de chips de computadora, ellos han entrado al reino del nanómetro en los últimos años: Las primeras compuertas de transistores debajo de los 100nm fueron a producción en el 2000. Sin embargo, mientras las leyes físicas relacionadas con la fabricación de los circuitos integrados de telecomunicaciones, memorias de computadoras y procesadores de hoy en día alcanzan sus límites, nuevos enfoques como la tecnología single-electrón (nanoelectrónica) o plasmonics (nanofotónica) son necesarios. La invención del microscopio de barrido de túnel, el desarrollo de materiales con propiedades dependientes del tamaño, la habilidad de codificar y manipular moléculas biológicas como el ácido desoxirribonucleico (DNA), son algunos de los desarrollos cruciales que la nanotecnología ha conseguido en el pasado reciente [14].

Una gama de productos que poseen las propiedades únicas de materiales a nanoescala están disponibles a los consumidores y la industria en estos momentos. Algunos usos de la nanotecnología en el mercado actual incluyen:

- Filtración de agua.
- Catálisis.
- Agentes de unión dental.
- Revestimientos para facilitar la limpieza de vidrio.
- Parachoques y convertidores catalíticos en automóviles.

- Recubrimientos protectores para lentes y automóviles.
- Cosméticos.
- Pelotas de tenis de larga duración.

Aplicaciones específicas en Telecomunicaciones y computación:

- Nanoelectrónica, Nanofotónica, Nanomateriales, nuevos circuitos integrados.
- Transmisión óptica.
- Switching óptico.
- Sistemas microelectromecánicos (MEMS) y sistemas microópticos-electromecánicos (MOEMS).
- Reconocimiento de voz, reconocimiento de patrones/imagen.
- Computación avanzada.
- Microprocesadores de "Integración a Teraescala".
- Criptografía cuántica.
- Nanosensores y nanoactuadores.

Enfocándonos en la electrónica y fotónica, notamos que el micrómetro es el rango representativo de la computación típica de finales de los 90 y principios del 2000: memoria de acceso aleatorio (RAM), memoria de solo lectura (ROM), y los microprocesadores del orden de los micrómetros. Todo el avance de la tecnología de procesadores y comunicación óptica es esencialmente el esfuerzo de encoger circuitos de micrómetros a fracciones de micrómetros (ejemplo 0.1 μ m o menos). En el silicio esta entre 0.5 y 0.1 μ m, algunas de las leyes básicas (como la ley de Ohm) empiezan a derrumbarse y las leyes de la teoría cuántica empiezan a ser importantes [15].

1.3 Impacto Tecnológico y Comercial

1.3.1 Tecnológico

El progreso y avance de la Nanotecnología molecular se está realizando en diferentes frentes tecnológicos, produciendo avances significativos en la manipulación molecular para la formación de vínculos químicos, en la electrónica molecular y el aprovechamiento de motores biomoleculares [16].

Los conceptos de nanomateriales y la nanociencia se están convirtiendo hoy por hoy en temas universales, es decir La nanotecnología es ahora una ciencia interdisciplinaria que extiende tópicos como: microingeniería, maquinaria de precisión, nanoelectrónica, nanofotónica, nanomateriales/nanoestructuras y la nanotecnología biomédica.

En la actualidad hay tres grandes áreas de la nanotecnología con énfasis en los nanomateriales, nanobiotecnología, y nanoelectrónica/fotónica, como se detalla en la tabla 1.1, donde se muestra una vista más específica de la concentración de investigaciones que se han realizado (desde 1996 hasta 2000) [8]:

Áreas	Numero de Publicaciones	% de Publicaciones
Nanopartículas	41918	18.4%
Computación Cuántica	41795	18.4%
Nanoestructuras Semiconductoras	22308	9.8%
Catálisis	18758	8.2%
Autoensamblados	18214	8.0%
Nanomedicina	16176	7.1%
Fullerenes	13230	5.8%
Nanocompuestos	12237	5.4%
Puntos Cuánticos	11863	5.2%
Biosensores	9921	4.4%
Nanotubos	9024	4.0%
Química supramoleculares	6628	2.9%
Almacenamiento y distribución de Energía	2883	1.3%
Nanoimpresión	2500	1.1%
	Total: 227455	100%

Tabla 1.1 Concentración de la Investigación

En la siguiente tabla 1.2 y 1.3 [17] se muestra las diferentes áreas y subdisciplinas de la nanotecnología.

Materiales Nanoestructurados	Materiales Nanofuncionales
	Nanopartículas
	Nanotubos de Carbono
	Nanotubos de Carbono "peapod"
	Nanodiamante
	Nanoalambre
	Nanorod
	Polímero Nanoestructurado
	Manipulación a nanoescala de polímeros
	Coatings Nanoestructurados
	Nanocatálisis
	Nanocristales
	Nanocristales en semiconductores de silicio
	Cristales fotónicos de Litografía delgadas
	Biomoléculas
	Nanocompuestos y materiales nanocristalinos
Síntesis y ensamblado de Nanomateriales	Nanopartículas
	Nanotubos de Carbono
	Nanomaquinaria
	Nanodeposición
	Métodos sol-gel
	Ball-milling
	Nanocompuestos
Métodos de Nanoabricación	Litografía (Rayos de electrones, Ultravioleta extrema); Nanolitografía Dip-Pen
	Crecimiento selectivo; Autoensamblado;
	Manipulación scanning tip
Nanomanipulación	Nanomanipulador
	Nanotweezer
Nanolitografía	Microscopio scanning probe (SPM)
	Nanolitografía Dip-pen
	Ultravioleta extrema(EUV)
	Nanolitografía de rayos de electrones/Rayos X
	Rayo de iones enfocado
	Nanolitografía de acoplamiento luminoso
	Nanolitografía impresa
Nanosensores	Sensores de nanotubos y nanoalambres
	Sensor de nanocompuestos
Comportamientos cuánticos y limite de escalamiento del CMOS	Ley de Moore/Escalamiento y limite del CMOS
	Teoría y mecánica cuántica
	Interferencia de onda, mecánica cuántica, tunelamiento, difracción
	Puntos cuánticos
	Alambras cuánticos
	Pozos cuánticos
	Corrales cuánticos

Tabla 1.2. Disciplinas y Subdisciplinas de la Nanotecnología

Nanoelectrónica	Nanoelectrónica de silicio
	Nanoelectrónica molecular
	Nanoelectrónica de carbono
	Nanoelectrónica DNA
	Nanoelectrónica Neuromorfica
	Magnetoresistencia balística (BMR) y Nanocontactos
	Electrónica individual
	Arreglos Josephson
	Spintronics
Nanofotónica	Nanocartuchos ópticos metálicos
	Estructuras de brecha de banda fotónica
	Estructuras de cristal fotónico
	Nanoóptica
	Nanocavidades
	Líneas de onda de cristal fotónico
Nanomecánica	Microscopio de fuerza atómica (AFM)
	Nanoresonadores
	Nanocantilevers
	Transistor nanomecánico
	Nanoacústica
	Nanofluidos
	Nanoindentation
	Nanorobots, Nanoelectromecánicos (NEMS) (MEMS)
	Nanomanipulador AFM
Nanomagnética	Magnetos a nanoescala
	Nanopartículas magnéticas
	Magnetoresistencia gigante (GMR)
	Spintronics
	Nanosensores magnéticos para almacenamiento magnético
Nanoquímica	Nanoquímica autoensamblada
	Nanocatálisis, baterías, celdas de combustible
	Litografía nanoelectroquímica
Nanobioteconología	Motores moleculares
	Electrónica biomolecular
	mtDNA (DNA mitocondrial)
	Técnicas de Micromanipulación, chips de genes
	Nanobiomedicina
	Nanobiosesores
	Estructuras biomoleculares Autoensambladas
	Bio-MEMS
	Bioelectronica
	Nanoelectrónica DNA
Nanoinstrumentación	Nanometrología y herramientas para materiales a
	Nanoescala

Tabla 1.3. Disciplinas y Subdisciplinas de la Nanotecnología

Es muy interesante observar en la tabla anterior, que la mayor parte de las subdisciplinas están muy enfocadas en la investigación y en la búsqueda de nuevos compuestos, con el objetivo de obtener mejores características finales de los materiales e integrarlos con otras áreas y subdisciplinas de la Nanotecnología.

1.3.2 Comercial

En lo que referencia al desarrollo e investigación en la parte comercial, en estos momentos la nanotecnología está siendo enfocada para trasladar los descubrimientos científicos en productos utilizables. Por otra parte existe un intenso interés y trabajo académico e institucional, con objetivos muy definidos que pretenden un trabajo comercial de rápida expansión a nivel mundial (Ver Figura 1.2 y 1.3).

Las investigaciones significativas en nanotecnología se han realizado en los últimos años en seis Centros de Ciencia e Ingeniería de Nanoescala, ubicados en la Universidad de Columbia (New York), Universidad de Cornell (Ithaca, NY), Instituto Politécnico Rensselaer (Troy, NY), Universidad Harvard (Cambridge, MA), Universidad Northwestern (Evanstons, IL) y Universidad Rice (Houston). En los últimos años ha habido mucho cubrimiento sobre la nanotecnología en revistas científicas, conferencias, universidades, reportes de investigación del mercado y hasta en prensa financiera y de negocios. Compañías de alta tecnología como NEC han adoptado la nanotecnología como una línea de investigación. En la actualidad existen cientos de laboratorios, compañías e instituciones académicas, trabajando en la Nanotecnología. A nivel corporativo por ejemplo, se encuentran compañías como: IBM, Intel, NEC, HP, Veeco Instruments, Perkin-Elmer, y FEI Corp) [2].

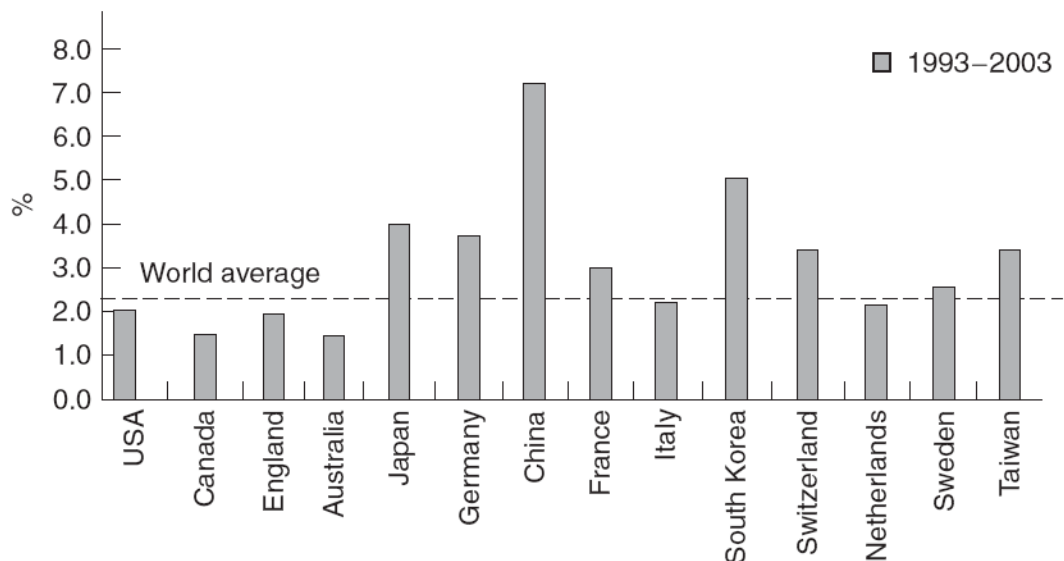


Figura 1.2. Investigación en Nanotecnología.
Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

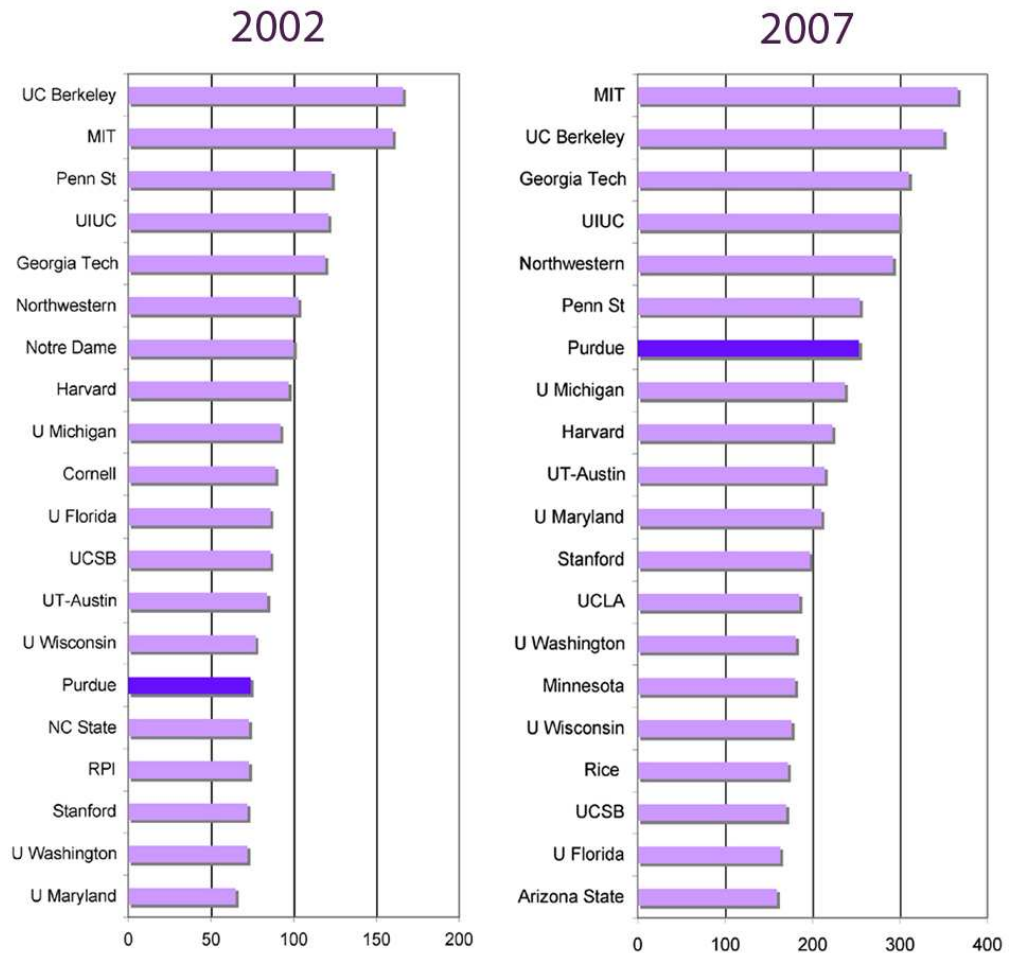


Figura 1.3. Investigación en Nanotecnología en Universidades de los Estados Unidos.
Fuente: Web of Science Database.

La investigación comercial se enfoca en seis categorías funcionales: nanomateriales y procesamiento de nanomateriales, nanofotónica, nanoelectrónica, nanoinstrumentación, nanobioteconología, y software. Como punto de referencia, en el 2002 habían alrededor de 50 compañías enfocadas en nanomateriales y el procesamiento de nanomateriales; estas compañías estaban en proceso de desarrollo de materiales, métodos para manipular y manufacturar productos basados en nanomateriales. Desde una perspectiva comercial, nanofotónica, nanoelectrónica, y nanobioteconología son promesas a corto plazo [2].

Los desarrollos en nanotecnología y sus tendencias pueden ser de interés para los vendedores, investigadores, y estudiantes de telecomunicaciones que quieren empezar a pensar en las oportunidades potenciales que pueden ofrecer estos desarrollos científicos y en los enfoques para la nueva generación de redes que se van a implementar en los siguientes años. Por ejemplo compañías de nanofotónica han desarrollado componentes para comunicaciones ópticas con un alto nivel de integración usando nanoóptica y tecnologías de nanomanufactura [2]

2. FUNDAMENTOS BÁSICOS

2.1. Teoría Fundamental

- **Átomos**

Los átomos son las partículas fundamentales de la materia, ellos son las partículas más pequeñas de un elemento que puede hacer parte de una reacción química. La hipótesis de que la materia está compuesta por partículas data del siglo VI A.C: la idea de “atomicidad” fue estudiada por académicos Griegos de la antigüedad como Leucippus, Democritus y Epicurus. Por supuesto, que todo el entendimiento científico fue desarrollado en el siglo XX [18].

Un elemento es una simple sustancia que no puede ser dividida en sustancias más simples por medios químicos normales. La física de las partículas es una rama de la física que estudia los elementos fundamentales de la materia (partículas subatómicas) y radiaciones; también estudia las interacciones entre ellas. Las partículas subatómicas incluyen bloques de construcción atómicos como los electrones, protones y neutrones (protones y neutrones son partículas compuestas de quarks) y partículas producidas por la radiación y procesos de dispersión, como fotones, neutrinos y muones.

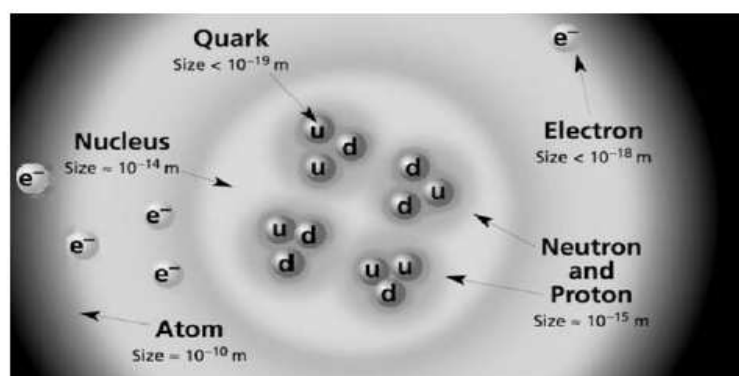
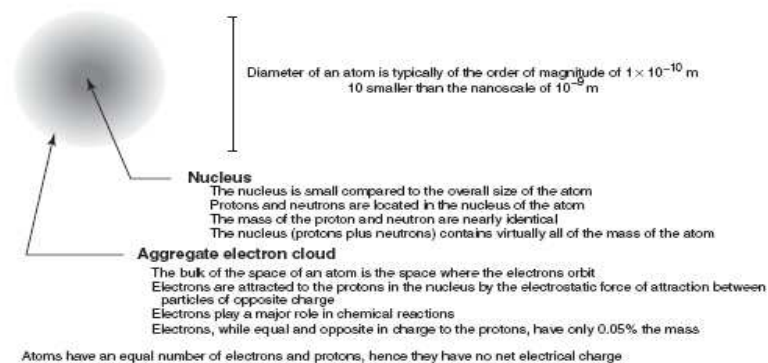


Figura 2.1 Composición de un átomo
Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

A un nivel simplificado, los átomos consisten de un núcleo cargado positivamente con electrones cargados negativamente orbitando alrededor. Ver la figura 2.1 [2]. El electrón está presente en todos los átomos. El diámetro de los núcleos están en el rango de $1 * 10^{-14}$ y $1 * 10^{-15}$ m; el diámetro de un átomo es típicamente del orden de $1 * 10^{-10}$ m. Un electrón es una partícula elemental del átomo teniendo una carga negativa y masa pequeña. El electrón tiene una masa 1/1836 la masa de un átomo de hidrogeno. Los electrones ocupan un volumen de espacio mediante sus orbitas muchas veces más grande que la ocupada por el núcleo [2].

- **Partículas Subatómicas claves**

En términos de aplicaciones prácticas en la ingeniería las siguientes partículas son de interés: protones, los cuales tienen una masa de $m = 1.6726231 * 10^{-24}$ g, con un diámetro del orden de $1 * 10^{-15}$ m, y una carga positiva; neutrones, los cuales tienen aproximadamente la misma masa de un protón como y el diámetro del orden de $1 * 10^{-15}$ m (como se observa en la figura 2.2) pero no tienen carga; electrones, los cuales son pequeños (aproximadamente 1/2000 de la masa de un protón), tienen un diámetro del orden de $1 * 10^{-18}$ m, y tienen carga negativa; y los fotones, la partícula portadora de las interacciones electromagnéticas, moviéndose a la velocidad de la luz (299792,460 m/s). El núcleo, el cual contiene la mayoría de masa en el átomo (pero que contiene solamente una parte muy pequeña del volumen), contiene protones y neutrones. Los protones están presentes en todos los átomos; un protón tiene aproximadamente la misma masa de un átomo de hidrogeno y tiene una carga igual en magnitud pero opuesta en signo que en electrón. Los neutrones son eléctricamente neutrales y tienen aproximadamente las misma masa de que un protón [2].

La nube de electrones alrededor del núcleo típicamente tiene un radio de 0.05-2 nm (0.5-20 Å). Los electrones no se mueven en orbitas esféricas si no en una variedad de orbitas difusas; además, solo se puede determinar la probabilidad de encontrar un electrón a cierta distancia de el núcleo, sin certeza determinística [2].

Como se ve en la figura 2.3, el diámetro de un núcleo atómico es de aproximadamente 10^{-4} Å ($1 * 10^{-14}$), siendo aproximadamente 0.01% de el diámetro del átomo. El núcleo de un átomo es denso. Por ejemplo, un núcleo que contiene un neutrón y un protón tiene los siguientes parámetros [2]:

- Mass of nucleus = (approximately) 3.32×10^{-24} g.
- Diameter of nucleus = (approximately) 1×10^{-4} Å = 1×10^{-14} m.
- Volume of nucleus = $(\frac{4}{3}) \times (\pi) \times (\text{radius of nucleus})^3 = 5.24 \times 10^{-43}$ m³.
- Ratio of mass/volume = 3.32×10^{-24} g / 5.24×10^{-43} m³ = 6.34×10^{18} g/m³.

Como punto de referencia, el átomo de hidrogeno tiene un radio de $0.208 * 10^{-9}$ m (0.28 nm) mientras el radio de un electrón es $0.2817 * 10^{-14}$ m (el radio del núcleo es aproximadamente 100000 veces más pequeño que el radio de todo el átomo). El radio de los núcleos atómicos está en el rango de $0.5 * 10^{-15}$ – $5 * 10^{-15}$ m. Esto significa que el átomo de hidrogeno tiene un radio

aproximadamente 73837 veces el radio de un electrón, esta para el hidrogeno significa que su núcleo es aproximadamente el tamaño del electrón. En la figura 2.2 y 2.3 se ilustran estas distancias dramáticamente.

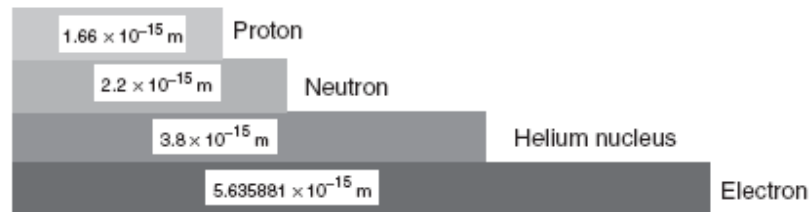


Figura 2.2. Escala algunas entidades atómicas
Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

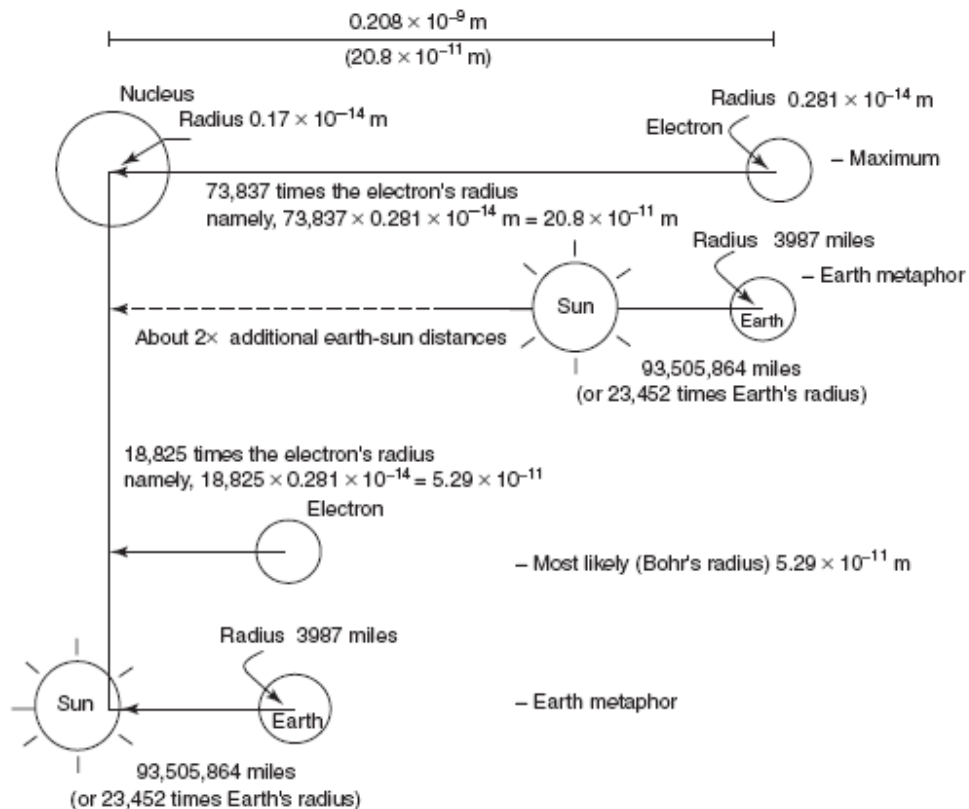


Figura 2.3. Algunas metáforas con las distancias atómicas.
Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

Si pensamos en la tierra con su radio de 3987 millas de radio, fuera un electrón y el centro del núcleo podría estar tan lejos como 294352858 millas. Esto significa que la distancia entre la tierra y el sol es de 93505864 millas (149600000km). Si la tierra fuera un electrón, el centro del núcleo podría estar tan lejos como 3 veces la distancia de la tierra al sol [2].

La Nanotecnología actualmente está enfocada a nivel molecular. Sin embargo para entender las moléculas se necesita entender la estructura atómica, particularmente la estructura del conjunto de electrones que comprenden el átomo. El número de electrones en un átomo estable es igual al número de protones; por lo tanto, la carga eléctrica promedio en un átomo es cero. Todos los átomos de un elemento tienen el mismo número de protones en el núcleo. De ello se deduce que como la carga neta en un átomo es cero, todos los átomos de un elemento deben tener un número igual de electrones. Aunque el número de neutrones típicamente es igual al número de protones, el número de neutrones puede variar en algún grado: los átomos que difieren solo en número de neutrones son llamados isótopos; de ello se deduce que dado que el neutrón tiene una masa de alrededor de 1.0087 amu, diferentes isótopos tienen diferentes masas [2].

2.2 Propiedades físicas de los materiales

- **Estructura Atómica**

En la física y química, es de interés determinar cómo los electrones están organizados cuando se unen al núcleo para formar átomos y moléculas. Este arreglo de electrones es denominado la estructura electrónica de un átomo o molécula. Existe una relación entre la estructura electrónica de un átomo y sus propiedades físicas. Las fuerzas que unen el átomo (aparte del propio núcleo) son electroestáticas: el núcleo cargado positivamente atrae electrones cargados negativamente. También existen fuerzas magnéticas que surgen del movimiento de partículas cargadas; sin embargo, estas fuerzas magnéticas son más pequeñas en magnitud que las fuerzas electroestáticas y no son responsables de unir la materia (sin embargo, estas fuerzas magnéticas dan lugar a un número importante de fenómenos).

La nube de electrones es el espacio donde los electrones orbitan el núcleo a una velocidad muy alta; la nube comprende una gran parte del volumen del átomo. La nube está subdividida en niveles de energía. Los electrones ocupan los niveles de menor energía. Por cada nivel de energía n el número máximo de electrones es $2n^2$. Para $n=1$, el máximo número de electrones es 2, para $n=2$ el número es 8; para $n=3$ el máximo es 18, y para $n=4$ el máximo es 32 [2].

La estructura electrónica es alterada durante una reacción química; sin embargo, solo el número y arreglo de electrones son cambiados. Durante una reacción química el núcleo permanece inalterado. Este mecanismo es el responsable de retener la identidad química del átomo durante una reacción química. De esto se deduce que para el propósito de entender las propiedades químicas y el comportamiento de los átomos, el núcleo de cierto elemento puede considerarse como un punto de carga de magnitud constante, dando como resultado un campo de fuerza central que une a los electrones al átomo [19, 20].

El número atómico es el número de protones en un átomo. El número de electrones es igual al número de protones. El número de masa es el número total de partículas en el núcleo, el número de protones en el núcleo más el número de

neutrones en el núcleo. La notación usada es (por ejemplo) $^{12}_6\text{C}$, donde el numero de arriba es el numero de masa en el elemento carbón y el número de abajo es el numero atómico (Figura 2.4). Un elemento consiste de átomos que tienen el mismo número atómico. Los átomos que tienen el mismo número atómico pero diferente número de masa son llamados isótopos. Los elementos son llamados por nombres comunes y al mismo tiempo por sus abreviaciones, estas consisten en una o dos letras con la primera en mayúscula. Algunos ejemplos son el carbono, C; oxígeno, O; azufre, S; aluminio, Al; cobre, Cu; hierro, Fe. Los nombres son mantenidos por la “*International Union of Pure and Applied Chemists (IUPAC)*” [2].

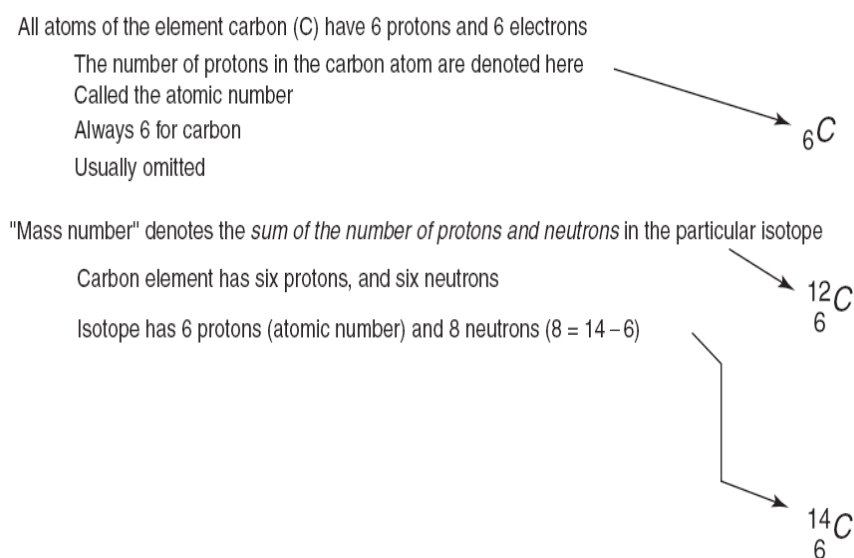


Figura 2.4 Nomenclatura
 Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

2.3 Propiedades químicas de los materiales

- **Sustancias y elementos**

La materia es un agregado de átomos. La materia es definida como cualquier cosa que tiene masa y ocupa un espacio. Se puede manifestar en tres estados físicos,; gas, líquido y sólido.

Una sustancia pura tiene una composición fija y tiene diferentes propiedades. Las sustancias puras tienen un conjunto de propiedades que son únicas para cada sustancia específica, particularmente si las sustancias es un elemento puro. Estas características nos permiten distinguir sustancias de otras. Estas propiedades caen en dos categorías generales: propiedades físicas y propiedades químicas. Las propiedades físicas son propiedades que pueden ser medidas sin alterar la identidad básica de la sustancia. Estas incluyen (pero no están limitadas) el peso, temperatura, resistencias eléctrica, entre otras. Las propiedades químicas son

propiedades que describen la manera en la cual una sustancia puede cambiar o reaccionar para formar otras sustancias.

Las sustancias pueden sufrir una serie de cambios en sus propiedades, y estos cambios pueden ser clasificados tanto como cambios físicos o cambios químicos. Los cambios físicos son aquellos cambios donde la sustancia cambia su estado o estructura física pero no su identidad básica. Por ejemplo ir de sólido a líquido, calentar las sustancias, cargar eléctricamente la sustancia, y/o magnetizar la sustancia. Los cambios químicos (también conocidos como reacciones químicas) son cambios donde la sustancia es transformada en una sustancia con diferentes propiedades químicas. Se ha demostrado empíricamente (también teóricamente) que todas las diferencias químicas y físicas entre los elementos son debido a la diferencia en el número de protones, electrones, y neutrones en el átomo.

Una mezcla es una combinación de dos o más sustancias donde cada sustancia retiene su propia identidad y/o propiedad física y química. Como en las mezclas los componentes retienen sus propiedades físicas y químicas, es posible separar los componentes basados en sus propiedades. Por ejemplo, se puede separar la sal del agua removiendo (evaporando) el agua. Las mezclas pueden ser heterogéneas o homogéneas. Las mezclas heterogéneas no son uniformes en el resultado final y pueden tener áreas de diferente apariencia y propiedades. Las mezclas homogéneas (también llamadas soluciones) son uniformes en el resultado final. El tipo más común de solución está compuesta por un sólido disuelto en un líquido [2].

Las sustancias puras están compuestas ya sea por elementos o compuestos. Los elementos son sustancias que en estado puro no pueden ser alteradas, reducidas o descompuestas en otras sustancias por medios químicos. Es una sustancia que no puede desglosarse o reducirse más. Ellas corresponden a materia compuesta por una sola clase de átomos. Los compuestos son sustancias que pueden ser alteradas, reducidas o descompuestas en otras sustancias mediante técnicas químicas. En otras palabras, se pueden descomponer en dos o más elementos. Los compuestos son dos o más sustancias unidas químicamente en proporciones específicas en masa. Por ejemplo, agua pura está compuesta por los elementos oxígeno y hidrógeno y en la proporción en masa de 89% oxígeno y 11% hidrógeno. La relación específica que representa la composición elemental de un compuesto puro es siempre la misma; conocida como la ley de composición (o la ley de proporciones definidas), esto se le atribuye al químico Francés Joseph Louis Proust. La mayoría de los elementos se pueden encontrar en la naturaleza en forma de moléculas con dos o más átomos unidos. Por ejemplo, el oxígeno se encuentra en su forma molecular como O_2 también como O_3 (también conocido como ozono).

2.4 Compuestos

La teoría cuántica muestra que los átomos contienen electrones que se ven obligados a existir en lugares con relación a otro que se han prescrito estrictamente. Estos posibles lugares se denominan orbitales atómicos, con los más importantes, orbitales frontera, localizados en el exterior. Cuando dos átomos

son atraídos para formar una molécula los orbitales atómicos de cada átomo pueden mezclarse para formar un nuevo conjunto de orbitales moleculares, que se denominan unión, antiunión o sin unión, dependiendo si los electrones en los orbitales moleculares tienen un efecto estabilizador, desestabilizador o neutral, respectivamente en sostener las moléculas juntas. Cuando los átomos se combinan para formar moléculas, el número de orbitales se conserva. Por ejemplo, unir un átomo que tiene cuatro orbitales de frontera con un átomo que tiene tres orbitales de frontera, da como resultado una molécula de siete orbitales de frontera molecular, posiblemente como un conjunto de tres uniones, tres antiuniones y un orbital sin unión. Si tres átomos fueran combinados, mas orbitales moleculares resultarían y igualmente con cuatro, cinco, o seis átomos. Cuando el número de átomos se vuelve grande, las diferencias en energía entre los orbitales adyacentes se vuelve pequeña a medida que se juntan más y más en la misma región de energía [21].

Bajo las condiciones adecuadas, grupos de elementos se pueden combinar mediante reacciones químicas para formar compuestos. Una variedad de “leyes empíricas” describen estos procesos; en la vida real algunos mecanismos muy complejos de la teoría cuántica están en juego, pero el resultado puede ser explicado y/o predicho mediante una de estas “leyes empíricas” [2].

2.5 Propiedades básicas de los conductores, aisladores y semiconductores

Para obtener un sentido pleno de las propiedades de los conductores, aisladores y semiconductores, debemos utilizar la física de la materia condensada. La física de la materia condensada es una subdisciplina de la física que se enfoca en varias propiedades que describen sustancias sólidas y líquidas, incluyendo sus características termales, elásticas, eléctricas, químicas, magnéticas, y ópticas. En términos de materia sólida, se han realizados avances teóricos en los últimos años para estudiar materiales cristalinos cuyos arreglos geométricos repetitivos de átomos son sistemas multipartícula. Estos sistemas son descritos en términos de teoría cuántica; sin embargo, debido a que los átomos en estado sólidos son coordinados a lo largo de largas distancias, la teoría debe extenderse más allá de niveles atómicos y moleculares. Además, los conductores como metales contienen electrones libres que gobiernan la conductividad eléctrica de todo el material, lo cual es una propiedad de todo el sólido y en lugar de cada uno de sus átomos. Los semiconductores cristalinos y amorfos y aisladores, así como las propiedades de la materia en estado líquido (cristales líquidos y líquidos cuánticos), son de estudiados también por la física de materia condensada. El fenómeno macroscópico cuántico observado en líquidos cuánticos, como la superfluidez, es también observado en ciertos materiales metálicos y cerámicos como superconductividad [22].

Los metales no sostienen sus electrones muy apretados. Un efecto importante de la naturaleza electropositiva de los metales es que los orbitales en los metales son altamente difusos y cubren espacio de gran volumen alrededor de los átomos, lo que permite a los orbitales interactuar directamente con muchos otros átomos a la vez para crear orbitales moleculares que están esparcidos a través de largas distancias. El efecto red es una banda continua de lugares disponibles y energía

para los electrones dentro de la sustancia. Finalmente, los metales tienden a tener más orbitales disponibles que electrones para que los ocupen. Combinando este hecho con la naturaleza de banda de la energía disponible y la deslocalización de los orbitales resultan en materiales que fácilmente transportan exceso de carga desde una ubicación a otra dentro de toda la sustancia de un conductor en otras palabras [2].

Los electrones en los no metales están más sostenidos al núcleo atómico. Estos electrones usados para formar uniones no son difusos e interactúan más fuertemente con pocos vecinos. Los orbitales moleculares y electrones en ellos están limitados a existir en pequeñas áreas entre átomos individuales. Esto resulta en consecuencias para la estructura de banda de los no metales. Los no metales también contienen muchos átomos por consiguiente muchos orbitales moleculares que forman bandas continuas. A diferencia de los metales, los no metales se caracterizan por conjuntos de múltiples bandas no superpuestas. Las bandas de menor energía que están llenas de electrones son llamadas bandas de valencia, así como las bandas vacías de más alta energía son conocidas como bandas de conducción. La diferencia de energía entre las bandas de valencia y conducción, se conoce como la brecha de banda, por lo general es muy grande para fácilmente promover un electrón de la banda de valencia a la de conducción o incluso para insertar un electrón a la banda de conducción usando una fuente eléctrica externa. Por esta razón, estos materiales son llamados aisladores [2].

Los materiales semimetales o metaloides tales como aluminio y silicio son intermedios en propiedades entre los metales y los no metales. Para estos materiales en volumen (con muchos átomos), una estructura de banda se convierte en distintas bandas separadas por una brecha de banda, como en los aisladores; sin embargo, la brecha de banda puede ser pequeña. Bajo condiciones apropiadas (por ejemplo potencial, calor, luz eléctrica aplicada), la banda de conducción llega a ser accesible y el material puede ser inducido para que conduzca como un conductor. Tales materiales con propiedades intermedias son llamados semiconductores. Para los semiconductores, el tamaño de la brecha de banda es un parámetro crítico importante que determina entre otras cosas el color del material, puesto que luz de longitudes de onda comparables con la brecha de banda pueden ser absorbidas por el material para promover un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción [2].

Una brecha de banda, es una banda prohibida de energía; una “banda” es específicamente un grupo espaciado levemente de niveles de energía en átomos, una gama de *energías* que los electrones pueden tener en un sólido. Cada banda representa un gran número de estados cuánticos permitidos. Los electrones exteriores del átomo forman la “banda de valencia” del sólido. Para que los electrones se muevan a través de un sólido, allí deben existir estados cuánticos vacíos con la misma energía y esto puede ocurrir solamente en una banda sin llenar, la “banda de conducción.” En general, los llamados metales son buenos conductores porque la banda de conducción parcialmente llenada se traslapa con una banda de valencia llena y los estados de energía vacantes en la banda de conducción son fácilmente disponibles para los electrones. En los aisladores, la banda de conducción y la banda de valencia están separadas por una larga banda

prohibida y los electrones no tienen la energía suficiente para saltar de una banda a otra. En “semiconductores” intrínsecos, la banda prohibida es estrecha y a temperaturas normales algunos electrones en la parte superior de la banda de valencia pueden moverse a la banda de conducción por agitación térmica. En un semiconductor dopado, las impurezas dopantes esencialmente crean una o más bandas de conducción delgadas en la banda prohibida. En este contexto la “brecha” se refiere a la brecha entre las bandas de energía, es decir, desde el límite superior de la banda de valencia hasta el límite inferior de la banda de conducción [23].

2.6 Propiedades básicas del silicio y operación básica de los transistores

El desarrollo de la microelectrónica, empezando con el transistor y después la agregación de transistores en microprocesadores, chips de memoria, y controladores, ha llevado a la era de la tecnología de la información (IT); estos dispositivos todos funcionan haciendo fluir electrones a través del silicio [24]. Los Transistores de efecto de campo (FETs), que están entre los dispositivos de fuerza de trabajo de la tecnología de la microelectrónica, son pequeños interruptores en los cuales el paso de la corriente eléctrica entre una “fuente” y un “drenaje” es controlado por un campo eléctrico en un componente intermedio llamado “compuerta”. Los investigadores que exploran maneras de fabricar sistemas electrónicos ultra pequeños empiezan con la ciencia de los semiconductores existente y después se mueven adelante utilizando extensiones, expansiones, o nuevos fenómenos. Por ejemplo, los dispositivos hechos de cilindros de átomos gruesos han incorporado “nanotubos de carbono” en una nueva clase de FET [25]; también hay interés en desarrollar polímeros de FET y mezclas de polímeros semiconductores, con características submicrométricas críticas en configuraciones planas y verticales [26, 27].

2.7 Transistores

Un transistor opera bajo el principio de semiconductancia. El silicio (Si) es el elemento más común utilizado comercialmente para este propósito. Un material como el silicio actúa como aislador; para obtener comportamientos de semiconductancia en el silicio, son añadidas impurezas para formar un compuesto. La estructura de un semiconductor es abarcada por bandas electrónicas (una directa o indirecta brecha de banda) caracterizada por la presencia de una brecha de banda entre una banda permitida y una llena (o una banda casi llena) llamada la banda de valencia y una banda vacía (o una banda casi vacía) llamada banda de conducción [28].

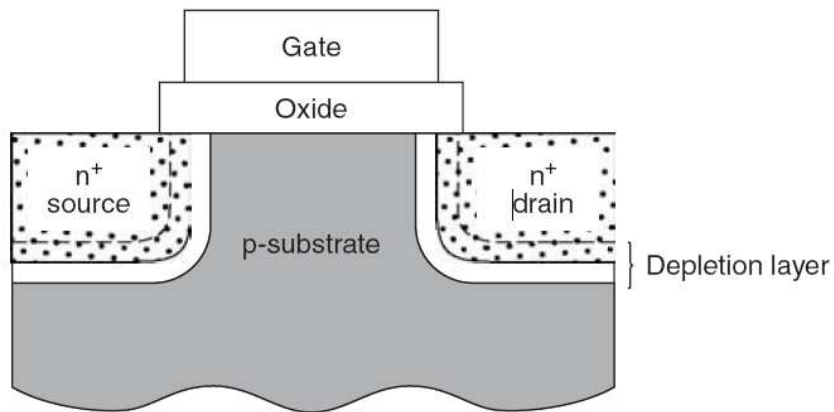


Figura 2.5 Transistor de efecto de campo
Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

El silicio tiene cuatro electrones orbitales externos que forman enlaces tetraédricos con otros cuatro átomos de silicio en un cristal; por consiguiente, según lo observado, todos los electrones están relacionados y el material actúa como un aislador. Cuando un átomo de fósforo con cinco electrones en el orbital exterior (u otro elemento de grupo V) se agrega, después de que cuatro electrones son usados para unir los átomos de silicio alrededor, hay un electrón “de sobra”. Este arreglo orbital permite la conducción electrónica cuando un voltaje es aplicado. El átomo de silicio se dice para formar un tipo n (región): La conducción del electrón es vía los electrones que llevan una carga negativa [2].

Cuando un átomo de Boro (o algunos otros del grupo III) reemplaza un átomo de silicio, el silicio se dice que es de tipo p (región). En este arreglo, el Boro puede unir tres átomos de silicio en el enrejado cristalino; sin embargo, queda un “agujero” donde estaba el cuarto enlace. Por consiguiente los electrones enlazados del orbital exterior de otros átomos de Si pueden moverse para llenar este “agujero” como consecuencia, esto deja un agujero detrás de donde los electrones vinieron del cristal. El efecto red es que el Si puede sostener la conducción mientras los electrones se mueven hacia los agujeros del sistema. Si una región tipo p del Si es puesta en vez de una región tipo n, entonces una capa de agotamiento se forma donde los electrones y agujeros se “aniquilan” entre ellos; también, los electrones no pueden fluir entre estas dos regiones a menos que una tensión adecuada es aplicada entre ellos (en otras palabras, la juntura p-n detiene los electrones de fluir a lo largo del sistema) [2].

Si una región tipo p del Si es puesta en vez de una región tipo n, entonces una capa de agotamiento se forma donde los electrones y agujeros se “aniquilan” entre ellos; también, los electrones no pueden fluir entre estas dos regiones a menos que un voltaje adecuado es aplicado entre ellos (en otras palabras, la juntura p-n detiene los electrones de fluir a lo largo del sistema) [2].

Estas observaciones se pueden utilizar para construir un transistor usable, como el semiconductor metal-óxido de efecto de campo (MOSFET), representado esquemáticamente en la figura 2.5.

Un MOSFET es un dispositivo planar de material semiconductor cuya concentración libre de portadora y, por lo tanto, su conductividad es controlada por la compuerta. Este transistor es un sustrato de silicio tipo p con un aislador (óxido) y una tira de metal (compuerta) arriba. Esta comprendido por dos uniones p-n. Sin la aplicación de un voltaje de compuerta, ninguna corriente fluye desde la fuente, contacto de silicio tipo n, y el drenaje, contacto de silicio tipo n.

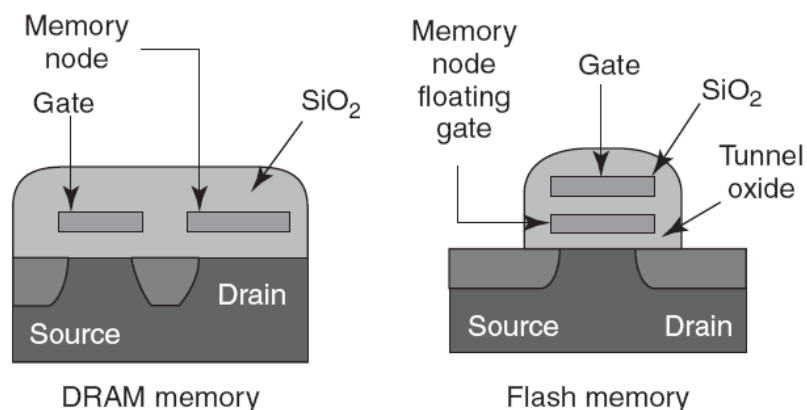


Figura 2.6 DRAM y memoria Flash
Fuente: Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking.

Cuando el voltaje es aplicado a la compuerta, los electrones son atraídos a la compuerta y ellos forman una capa delgada en las proximidades de la superficie del silicio tipo p. Entonces sigue que los electrones pueden ser transportados desde el contacto de la fuente hasta el contacto del drenaje. La compuerta en efecto, cambia la corriente de apagada a encendida entre la fuente y el drenaje. La compuerta funciona induciendo carga eléctrica en el silicio debajo de ella, lo cual provee un canal para que la corriente fluya; si la capacitancia de la compuerta es demasiado baja, insuficiente carga estará presente en el canal para que este conduzca; por lo tanto, la capacitancia debe estar diseñada adecuadamente. [29].

Unidades de microprocesamiento hoy en día emplean una arquitectura CMOS que incorpora dos transistores MOSFET; un transistor usa los electrones como capa de conducción y el segundo transistor usa los agujeros. La ventaja de este arreglo es que la potencia es disipada solamente (aparte de eso resultando desde cualquier corriente de fuga en el transistor) cuando el circuito conmuta, de tal modo reduciendo sustancialmente el consumo de potencia del integrado. Puesto que la densidad de integración de un chip está limitada por la disipación de potencia, la capacidad de escalar a transistores más pequeños facilita la densidad de integración desde los requerimientos de potencia y tamaño. La figura 2.6 representa dos ejemplos de compuertas de memoria [2].

2.8 Limitaciones de fabricación

Mientras la tecnología del semiconductor se ha sostenido (crecimiento exponencial), con adelantos significativos en densidad de compuertas Booleanas en un chip durante los últimos 40 años, estos avances pueden estar llegando a su límite asintótico en los próximos 10 años. En los sistemas basados en CMOS, mientras las interconexiones son reducidas en tamaño, la resistencia aumenta más rápido que lo que decrece la capacitancia (habilidad de guardar carga/energía eléctrica); por lo tanto, las constantes de tiempo RC se incrementan para las reducidas interconexiones y la velocidad del circuito se reduce correspondientemente. Este es solamente uno de los varios problemas que enfrenta la miniaturización [2].

En una regla dada de diseño, el escalamiento de los procesos físicos se derrumba y un nuevo fenómeno que está ausente en las grandes estructuras empieza a dominar el comportamiento del dispositivo. Por ejemplo, en algún punto, en el decrecimiento del tamaño del MOSFET, la longitud del canal se aproxima al ancho de la capa de agotamiento de la fuente y el drenaje. Esto resulta una degradación de las características subumbrales del dispositivo (limitaciones máximas del dispositivo) y una deficiencia en alcanzar la corriente de saturación, entre otros desafíos. Uno puede eliminar estos y otros efectos de canal corto mediante el alto dopaje en el canal, pero a expensas de reducción en la movilidad baja velocidad de operación y un incremento del riesgo de avalanchas en el drenaje [30] (efectos de segundo orden en diseño CMOS como la degradación de la movilidad, valor de umbral corregido, parámetro de umbral corregido, longitud efectiva del canal se deben a dimensiones del canal corto menores de 3 μm). En los MOSFET, para una corriente de drenaje, hay dos grados independientes de libertad de diseño: el nivel de inversión y la longitud del canal (nótese que el ancho del canal, requerido para la disposición, se encuentra en la corriente de operación de drenaje y el nivel de inversión seleccionado y la longitud del canal). Hay compensaciones bastante visibles en el ancho de banda del circuito, transconductancia, conductancia de salida, ganancia de corriente directa (DC), emparejamiento DC, linealidad, ruido blanco, ruido parpadeante y área de disposición resultado de la selección del canal de inversión y la longitud del canal [31]. Como los dispositivos MOSFET son escalados en la arena de longitud de compuerta de 100nm, este se vuelve importante para reducir el efecto de canal corto (SCE) [32]. Además si se quiere avanzar en el área de los 100nm con menos umbral de voltaje, es más importante reducir el SCE, el cual se manifiesta como la baja del umbral de voltaje en longitudes cortas del canal para una tecnología dada; se ha reportado que el diseño del canal y el drenaje pueden reducir el SCE. Algunos de los alcances estudiados en este contexto incluyen perfil del canal SSR (supersteep retrograde), estructura halo, estructuras *Recessed-Channel*, dispositivos *Silicon-on-insulator* (SOI). En los dispositivos SOI el canal de silicio puede ser agotado completamente; por otra parte, SOI permite la fabricación de estructuras 3D con la compuerta cercado en canal. La geometría específica de la compuerta puede invertir el canal, bajo condiciones favorables y esta inversión del volumen se cree que puede ser ventajosa para las características eléctricas [33].

Además de las técnicas litográficas de 248/197nm, otros acercamientos orientados a la litografía incluyen fuentes EUV, Rayos X, y rayos de electrones (en la figura 2.7 se muestran varios métodos). Los acercamientos litográficos requieren ambientes muy limpios porque las macropartículas y el polvo pueden enmascarar la parte del área expuesta. Para producciones altas, los cuartos limpios deben tener densidades de partículas extremadamente bajas y en tamaños mucho más pequeños, que el tamaño litográfico mínimo. Estos requerimientos implican que el costo de la litografía no es trivial y este se incrementa rápidamente a medida que el tamaño decrece y puede eventualmente desacelerar el proceso de microelectrónica [2].

La nanotecnología (nanofotónica y nanoelectrónica) se está desarrollando como una forma para romper con los cuellos de botella y las restricciones de diseño.

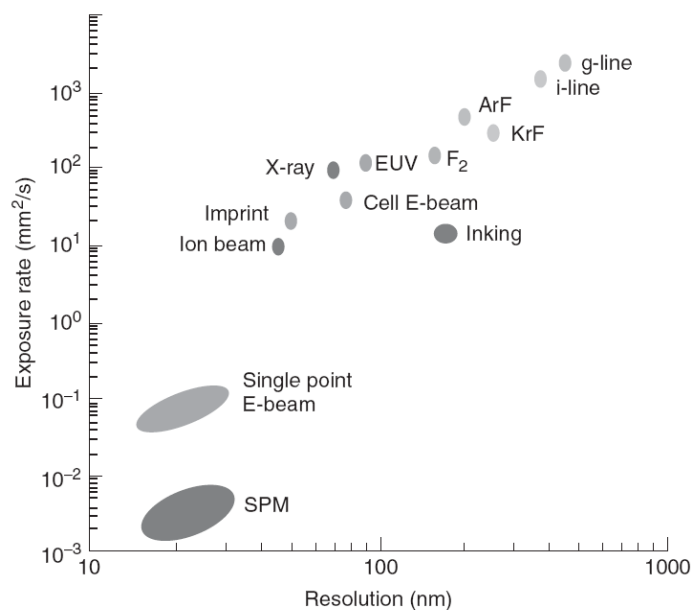


Figura 2.7 Rendimiento vs. Resolución de 29 técnicas litográficas
Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

3. NANOESTRUCTURAS BASICAS

Existen tres áreas distintas de la nanotecnología, pero que una depende de la otra [34]:

- *Nanotecnología "Húmeda"*: es el área encargada del estudio de sistemas biológicos que existen principalmente en un ambiente acuático. Son de interés las estructuras funcionales de escala nanométrica: materiales genéticos, membranas, enzimas y otros componentes celulares; el éxito de esta nanotecnología es demostrado por la existencia de organismos vivos cuya forma y función están gobernados por las interacciones de estructuras a escala nanométrica.
- *Nanotecnología "Seca"*: Este es el estudio de la fabricación de estructuras en carbono (ejemplo nanotubos), silicio y otros materiales no orgánicos. Esta área se

basa en y se deriva de la ciencia de superficies y la fisicoquímica. A diferencia de la tecnología húmeda, las técnicas secas hacen uso de metales y semiconductores. Los electrones de conducción activan estos materiales, se hacen muy reactivos para operar en un ambiente húmedo, pero las propiedades físicas de los electrones proveen a las nanoestructuras secas, ser prometedoras para ser usadas en dispositivos: electrónicos, magnéticos y ópticos. Un objetivo de la investigación y desarrollo de muchas industrias es desarrollar estructuras secas que posean algunos de los mismos atributos que las húmedas exhiben.

- *Nanotecnología computacional*: Este es el modelado y simulación de estructuras complejas a escala nanométrica. El poder analítico y predictivo de la computación, la cual es crítico para tener éxito en la nanotecnología.

Las nanopartículas tienen distintas propiedades comparadas con los materiales a granel, debido al número de átomos o moléculas en su superficie, la cual es comparable con las del interior de las partículas; de tal modo que, las nanopartículas pueden ser usadas para desarrollar materiales con propiedades únicas [35].

3.1 Propiedades de la Nanopartícula y el Efecto del Tamaño

Generalmente como se mencionó antes, estas partículas tienden a mostrar diferentes propiedades, aún propiedades físicas que son consideradas como específicas, como el punto de fusión y la constante dieléctrica, las cuales pueden cambiar. Estos cambios en las propiedades fundamentales con el tamaño de la partícula son llamados “efecto de tamaño”. En un sentido más amplio, esto también puede incluir el cambio de varias características y comportamientos de las partículas. Las nanopartículas tienen varias características únicas en las propiedades morfológicas/estructurales, térmicas, electromagnéticas, ópticas y mecánicas.

3.1.1 Propiedades Morfológicas/Estructurales

El tamaño ultrafino de las nanopartículas es una de las funciones más útiles. Por ejemplo, las partículas más finas son aptas para ser absorbidas más fácilmente a través de la membrana biológica. Se conoce como el efecto de penetración y retención mejorado (EPR) [36], dado que las partículas que tienen un tamaño aproximado de 50 a 100nm, no se transferirán partículas a las células normales, a través de la pared vascular. Estas podrían ser entregadas selectivamente a ciertas células afectadas debido al alargamiento de la brecha celular de esta parte.

La gran área de superficie específica de las nanopartículas es una propiedad importante para la reactividad, solubilidad, rendimiento de sinterización etc., relacionada con la masa y la transferencia de calor entre las partículas y sus alrededores desde un punto de vista morfológico aparte del de la superficie y estructuras internas de las nanopartículas. Además, la estructura cristalina de las partículas puede cambiar en algunos casos con el tamaño de la partícula en el rango de tamaños nanométricos.

3.1.2 Propiedades Térmicas

Así como los átomos y las moléculas localizadas en la superficie de la partícula empiezan a convertirse influyentes en el orden de los nanómetros, el punto de fusión del material decrece con respecto al material a granel, porque ellos tienden a poder moverse más fácilmente a más bajas temperaturas.

Por ejemplo, el punto de fusión del oro es 1336 K a granel, pero empieza a decrecer considerablemente a un tamaño de partícula de alrededor de 20 nm y drásticamente debajo de los 10 nm se convierte entonces en una reducción de más de 500 grados alrededor de los 2 nm. La reducción de punto de fusión de partículas ultrafinas se considera como una de las propiedades únicas de las nanopartículas relacionados con la agregación y crecimiento del grano de las nanopartículas o mejora en el desempeño de la sinterización de materiales cerámicos [37].

3.1.3 Propiedades Electromagnéticas

Las nanopartículas son usadas como materias primas para un número de dispositivos electrónicos. Las propiedades eléctricas y tamaño de estas nanopartículas juegan un rol importante para el mejoramiento del desempeño del producto [38]. Por ejemplo, hay una gran demanda por materiales con una constante dieléctrica alta para desarrollar dispositivos electrónicos pequeños y delgados. Para este propósito, se ha confirmado por ejemplo que mediante el análisis de la difracción de rayos X, la constante dieléctrica del PbTiO_3 tiende a incrementar considerablemente a medida que las partículas se vuelven más pequeñas que 20 nm. Mientras tanto, también es conocido que cuando la constante dieléctrica es medida con una pelotilla preparada presionando estas nanopartículas, este muestra un pico con la materia prima alrededor de 100 nm y decrece con la reducción del tamaño de la partícula, lo cual se puede atribuir a la influencia de la barrera de grano y el vacío en la pelotilla [39].

Por otra parte, el tamaño mínimo de las partículas para conservar la propiedad ferroeléctrica (tamaño crítico) difiere dependiendo de la clase y composición de los materiales. De acuerdo con [40] para algunas clases de materiales, este varía desde 7 nm para el compuesto PbTiO_3 hasta 317 nm para el Ba-Pb-Ti. El punto del Curie se define como el punto que cambia desde el material ferroeléctrico a la fase paraeléctrica del PbTiO_3 , la cual se reduce drásticamente con el decrecimiento del tamaño de la partícula debajo de los 20-30 nm.

En cuanto a la propiedad magnética, partículas ferromagnéticas finas tienen una sola estructura de dominio magnético mientras que llegan a ser muy pequeñas en el orden de menos de 1 μm y muestran una propiedad súper-paramagnética, cuando se vuelven más finas. En este caso, aunque las partículas individuales son ferromagnéticas con la única estructura de dominio magnético, las partículas se comportan colectivamente como paramagnéticas. Se magnetiza como un todo en la misma dirección del campo magnético externo, pero la magnetización desaparece por la fluctuación termal, cuando se remueve el campo magnético externo. El tiempo para la desaparición de la magnetización depende del tamaño de la partícula, la magnetización del material responde puntualmente con el

campo magnético externo como paramagnético, cuando las partículas son lo suficientemente pequeñas, pero este decrece gradualmente al medida que el tamaño de la partícula se vuelve más grande. Como resultado de este cambio dentro de las propiedades electromagnéticas de las nanopartículas, también es conocido por ejemplo que el oro es una sustancia estable a granel, muestra características catalíticas únicas como nanopartícula [41].

3.1.4 Propiedades Ópticas

A medida que el tamaño de las partículas entra en el rango de los nanómetros, ellas absorben la luz con una longitud de onda específica como la absorción de plasmones [42], causado por la oscilación de plasma de los electrones y la luz transmitida con diferente color, dependiendo del tipo del metal y tamaño del la partícula obtenida [43].

En el caso de las nanopartículas de oro, se ha reportado que la máxima absorción de longitudes de onda de luz es de 525 nm, para las partículas de 15 nm se agranda alrededor de 45 y 50 nm. Esto es debido a que las nanopartículas son más pequeñas que la longitud de onda de la luz visible y la dispersión luminosa, porque estas partículas llega a ser insignificante, alta transparencia, que puede ser obtenida con las nanopartículas de pigmento convencional.

Por otra parte, en lo que concierne al desempeño de la emisión de luz, el tipo de transición indirecta a sustancias como Silicio y Germanio, las cuales como material a granel no emiten luz, dan alta eficiencia en emisión de luz como resultado del efecto cuántico, cuando el tamaño de la partícula es reducido a un tamaño considerable en nanómetros.

3.1.5 Propiedades Mecánicas

Es conocido que la dureza de los materiales cristalinos incrementa con el decrecimiento del tamaño cristalino y que la fuerza mecánica de los materiales aumenta considerablemente por la micronización de la estructura del metal y del material cerámico o la composición de ellos en un nano rango [44, 45]. Además, con el material cerámico teniendo un tamaño cristalino más pequeño que cientos de nanómetros, se observa que el fenómeno único súper-plástico se extiende miles de veces, desde el tamaño original a elevadas temperaturas por encima del 50% del punto de fusión [46], lo cual puede proveer la posibilidad de formar y procesar las cerámicas como materiales metálicos.

3.2 NANOESTRUCTURAS

3.2.1 Nanotubos de Carbono

Estas estructuras son también llamadas *Buckytubes*, nanotubos de carbono de pared-única (SWCNTs), o nanotubos de pared-única (SWNTs). La investigación de los SWNT a tomado lugar en los principios de 1990: en la pasada década se visto un gran interés en fullerenes (tercera forma más estable del carbono) y nanomateriales relacionados con el carbono. Ha habido un rápido desarrollo en la pasada década en el entendimiento de la química y física de los nanotubos de carbono e interés en la ciencia de los materiales y

las comunidades electrónicas con relación a las posibles aplicaciones de estas estructuras únicas [23].

Los nanotubos de carbono consisten en capas de grafito sin estar cosidas a cilindros: los SWNT tienen una estructura cilíndrica hecha de una sola hoja de *graphene*, una gran macromolécula, moldeado en una hoja cilíndrica (un enrejado hexagonal de carbono); los extremos del cilindro están terminados por los casquillos hemisféricos. Ver Figura 3. La formulación molecular de los nanotubos de carbono de pared-única, quiere que cada átomo este en su lugar correcto; esta estructura provee nanotubos de carbono de pared-única con sus propiedades únicas. Los SWNT basados en carbono pueden ser metálicos o semiconductivos; ellos ofrecen posibilidades interesantes para crear futuros dispositivos, circuitos y computadores nanoelectrónicos [2].

Los nanotubos de carbono son una macromolécula de carbono (uno puede visualizar esto como una hoja de grafito enrollada en un cilindro; el grafito luce como una hoja de “alambre de púas”, un mosaico de anillos hexagonales de carbono). Diferentes tipos de nanotubos están definidos por el diámetro, longitud, y torcedura. En adición a los SWNTs de e investigación cilindro, también existen nanotubos de paredes múltiples (MWNTs) con cilindros dentro de otros cilindros. La longitud del nanotubo puede ser millones de veces más grande que su diámetro (los tubos pueden ser de 1-2 mm de largo [25]).

La naturaleza fortuita del aparato de unión del carbono soporta la “perfección molecular” (también llamado “configuración ideal”) de nanotubos, dando como resultado a alótropos con las características valiosas tales como conductividad eléctrica, conductividad térmica, fuerza, tesura, y dureza. Esta nueva clase de materiales de carbono consisten de cadenas de carbono cerradas (sp^2 Hibridizada), organizada en la base de 12 pentágonos y cualquier número de hexágonos, excepto por el numero uno [47]. En los SWNT el electrón π deslocalizado donado por cada átomo de carbono, es libre de moverse por toda la estructura, en vez de quedarse en “casa” con su átomo donante, dando como nacimiento a la primera molécula conocida con conductividad eléctrica tipo metálica [48]. Además, la alta frecuencia de las vibraciones de la unión carbono-carbono provee una conductividad termal intrínseca que es mayor a la conductividad del diamante. En el diamante la conductividad térmica es la misma en todas las direcciones; SWNTs, por otra parte, conducen el calor hacia abajo del eje del tubo. Ver figura 3.1.

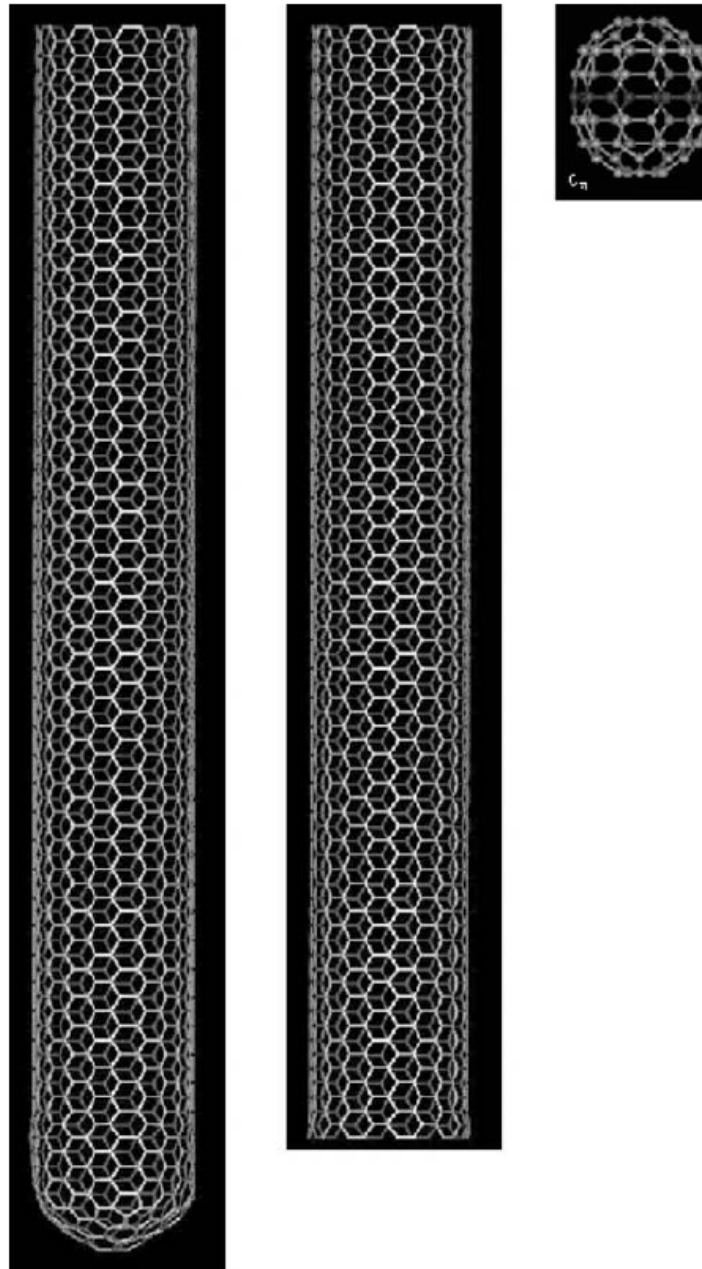


Figura 3. Nanotubos de carbono de pared única
 Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

Ningún otro elemento crea uniones con sí mismo en una cadena extendida con la fuerza de la unión C-C.

El grafito común tiene átomos agrupados uno encima del otro, pero estos se deslizan uno de otro y pueden ser separados fácilmente; cuando se enrolla, el arreglo de carbono se vuelve muy fuerte. Los nanotubos de carbono tienen propiedades físicas interesantes y

útiles; por ejemplo, ellos son 100 veces más fuertes que el acero, siendo 6 veces más liviano. La alta rigidez de los nanotubos hacia el doblez, excede la de los materiales conocidos. Los nanotubos individuales pueden ser las estructuras más delgadas hechas por el hombre que son lo suficientemente rígidas para soportarse a sí mismas [49]. Los nanotubos también son muy buenos conductores de la electricidad. Los nanotubos de carbono tienen la misma conductividad eléctrica que el cobre (ellos tienen la habilidad de ser semiconductivos o metálicos, dependiendo del “trenzado” del tubo). Los nanotubos son livianos, termalmente estables, y son químicamente inertes. Además, los nanotubos pueden resistir a altas temperaturas (hasta 1500°C en vacío). SWNTs también tienen una gran área de superficie (~1000 m²/g). Los nanotubos son los mejores emisores de electrones de campo conocidos. Los SWNT pueden modelarse como un transporte de electrones de una dimensión. De acuerdo con estudios teóricos, dichos sistemas deben ser sensibles a la repulsión de cargas y a bajas temperaturas convertirse en aisladores; sin embargo, los investigadores han demostrado que es posible crear junturas superconductoras cuando los nanotubos de carbono están conectados a contactos superconductores, un fenómeno llamado *superconductividad inducida por proximidad* [23].

Los nanotubos son “molecularmente ideales”, lo que implica que ellos están libres de fallas relacionadas con la degradación de las propiedades en la estructura; las propiedades de sus materiales pueden, entonces, acercarse mucho sus altos niveles teóricos intrínsecos. Las moléculas de los nanotubos pueden ser manipuladas químicamente y físicamente. Como en los polímeros de carbono puro, los nanotubos pueden ser reactivos y manipulados usando la bien desarrollada química del carbono (esto provee la oportunidad de modificar la estructura y optimizar la solubilidad y dispersión) [49]. Los nanotubos de carbono son ideales para la investigación de la interface entre la física atómica y nanoscópica [50].

La siguiente lista provee algunas de los parámetros físicos de los nanotubos. Estos tipos de moléculas son notables para dispositivos macroscópicos de este tamaño: Los nanotubos tienen solo algunos nanómetros de diámetro (1.2nm para los SWNTs) y hasta alrededor de 1mm de largo. El largo de la unión de carbono es de 1.42 Å; la superposición de energía de la unión C-C esta por el orden de 2.5 eV. Los nanotubos no siempre son perfectamente cilíndricos debido a que ellos se doblan en ellos mismo o incluso soportando junturas Y. Ver figura 3.1

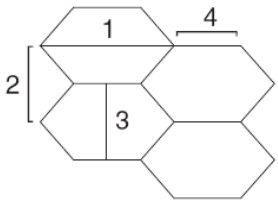
Diameter of SWNTs:	12–14 Å (1.2–1.4 nm)	
Distance from opposite carbon atoms (segment 1):	2.83 Å	
Analogous carbon atom separation (segment 2):	2.456 Å	
Parallel carbon bond separation (segment 3):	2.45 Å	
Carbon bond length (segment 4):	1.42 Å	

Figura 3.1 Características de los SWNT
Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

Las propiedades inusuales de los nanotubos de carbono hacen posible muchas aplicaciones desde electrodos para baterías, dispositivos electrónicos, hasta el refuerzo de fibras, que hacen a los compuestos más fuertes [2].

3.2.2 Emisión de Campo y Blindaje

Cuando un campo eléctrico pequeño es aplicado paralelamente al eje de un nanotubo, los electrones son emitidos a una tasa muy alta desde los extremos del tubo. Esto es llamado emisión de campo. Este efecto puede ser fácilmente observado mediante la aplicación de una pequeña tensión entre dos electrodos paralelos metálicos y esparciendo una pasta compuesta de nanotubos en un electrodo. Un número suficiente de tubos estarán perpendicular al electrodo, entonces esa emisión de electrones puede ser observada. Una aplicación para este efecto es el desarrollo de pantallas planas. Samsung en Corea, desarrolló una pantalla de panel plano usando la emisión de electrones de nanotubos de carbono. Muchas empresas utilizan este efecto de emisión de electrones para hacer lámparas de tubos vacíos, que son tan brillantes como las lámparas convencionales, las cuales duran más y son mucho más eficientes [51].

La alta conductividad eléctrica de los nanotubos de carbono, significa que ellos van a ser pobres transmisores de energía electromagnética. Un compuesto plástico de nanotubos de carbono podría proveer un material de blindaje de bajo peso para la radiación electromagnética. Esta es una materia de mucho interés para la milicia, la cual está desarrollando un campo de batalla altamente digitalizado para el comando, control y comunicación. Los computadores y los dispositivos electrónicos que son partes de este sistema deben estar protegidos de armas que emiten pulsos electromagnéticos [51].

3.2.3 Computadores

Se ha demostrado la viabilidad de diseñar transistores de efecto de campo (FETs), los componentes de conmutación de los computadores, basados en nanotubos de carbono conectados a dos electrodos de oro. Cuando una pequeña tensión es aplicada a la compuerta, al sustrato de silicio, la corriente fluye a través del nanotubo entre la fuente y el drenaje. El dispositivo conmuta a estado encendido cuando la corriente esta fluyendo y apagado cuando no lo hace. Se ha encontrado que una pequeña tensión aplicada a la compuerta puede cambiar la conductividad del nanotubo por un factor $> 1 \times 10^6$, lo cual es comparable con los transistores de efecto de campo de silicio. Se ha estimado que el tiempo de conmutación de estos dispositivos puede ser muy rápido, permitiendo velocidades de reloj de terahertz. La fuente y drenaje de oro, son depositados mediante métodos litográficos y el nanotubo conector es menos de un nanómetro de diámetro. Este pequeño tamaño permite más conmutadores puedan ser empaquetados en un chip [51].

Un gran objetivo de los desarrolladores de computadores es incrementar el número de conmutadores en un chip. A medida que la sección trasversal de un alambre metálico decrece, como el cobre, la resistencia incrementa, y el calor generado por la corriente que fluye en el alambre incrementa. El calor puede llegar a cierto punto que puede derretir o vaporizar el alambre. Sin embargo, los nanotubos de carbono con diámetros de 2 nm tienen una resistencia extremadamente baja y estos pueden llevar grandes corrientes sin

calentarse. Su alta conductividad termal significa que pueden servir como disipadores, permitiendo la rápida evacuación de calor fuera del chip [51].

3.2.4 Celdas de Combustible

Los nanotubos de carbono tienen aplicaciones en la tecnología de baterías. El litio, el cual es un portador de carga en algunas baterías, puede ser almacenado dentro de nanotubos. Se estima que un átomo de litio puede ser almacenado por cada seis átomos de carbono. Almacenar hidrogeno en nanotubos es otra posible aplicación, una que está relacionada con el desarrollo de celdas de combustible como fuente de energía eléctrica para automóviles [51].

Una celda de combustible consiste en dos electrodos separados por un electrolito especial, que permite pasar a través de iones de hidrogeno, pero no electrones. El hidrogeno es enviado al ánodo, donde esta ionizado. Los electrones liberados viajan a través de un cable del circuito al cátodo. Los iones de hidrogeno se difunden a través del electrolito hacia el cátodo, donde los electrones, el hidrogeno y el oxigeno se combinan para formar agua. El sistema necesita una fuente de hidrogeno. Una posibilidad es la de almacenar hidrogeno dentro de nanotubos de carbono. Se ha estimado que para que esta aplicación sea útil, los tubos necesitan mantener 6.5% de hidrogeno por peso [51].

3.2.5 Sensores Químicos

Un transistor de efecto de campo, hecho de los quirales (moléculas que se relacionan entre si) semiconductivos de nanotubos de carbono, ha demostrado ser un detector sensible a varios gases [51].

3.2.6 Nanoalambres

Los nanoalambres [también llamados alambres cuánticos (QWR). Ver figura 3.2] están en las estructuras a nanoescala en una dimensión con propiedades eléctricas y/o propiedades ópticas. Los nanoalambres han sido de gran interés en los últimos años, debido a sus propiedades cuánticas inusuales y su potencial de uso como: nanoconectores y dispositivos a nanoescala. Para poder tener propiedades físicas mejoradas, los alambres deben ser de diámetro pequeño, deben tener alta relación de aspecto y deben estar orientados uniformemente [52]. Los nanoalambres no están basados en materiales de nanotubos.

Los nanoalambres tienen aplicaciones potenciales en áreas que van desde las puntas de un microscopio, hasta la nanoelectrónica. Los nanoalambres se consideran como una de los componentes claves para la visionaria construcción de chips electrónicos moleculares: ellos pueden ensamblarse en rejillas y volverse la base para los circuitos lógicos a nanoescala. Claramente los nanoalambres necesitan tener capacidades de conexiones físicas en sus extremos. La estabilidad de los nanoalambres, sin embargo, es una preocupación porque los alambres de metal de aproximadamente 1 nm de diámetro pueden existir solo transitoriamente, en algunos casos de manufactura (menos de 10 segundos en vacío ultra alto); se viene trabajando para remediar esta situación [52].

Se ha mencionado que los nanotubos de carbono son los mejores candidatos para reemplazar algunos de los alambres dentro de los chips; esto se espera que sea factible para la primera parte de la década de 2010 [2].

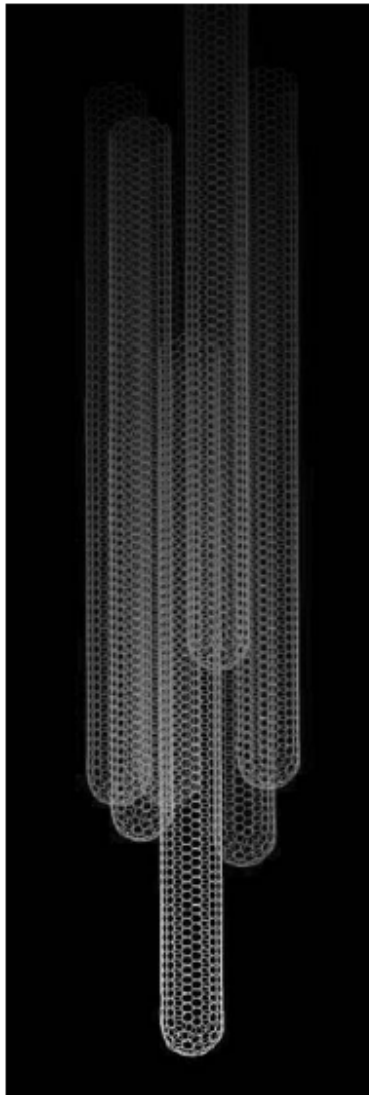


Figura 3.2. Nanocuerdas
Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*.

3.2.7 Nanoconos

Los conos de carbón de pared única (Ver figura 3.3), fueron reportados por primera vez por Harris en 1994 [53]. El grupo de *Sumio Iijima*, después mostró que esta estructura se podría producir mediante la ablación láser del grafito (el grupo de Iijima les puso como nombre “nanocuernos”). Se ha demostrado que los nanoconos tienen unas propiedades absorbentes y catalíticas buenas, que pueden ser utilizadas como componentes para celdas de combustibles de alta calidad.

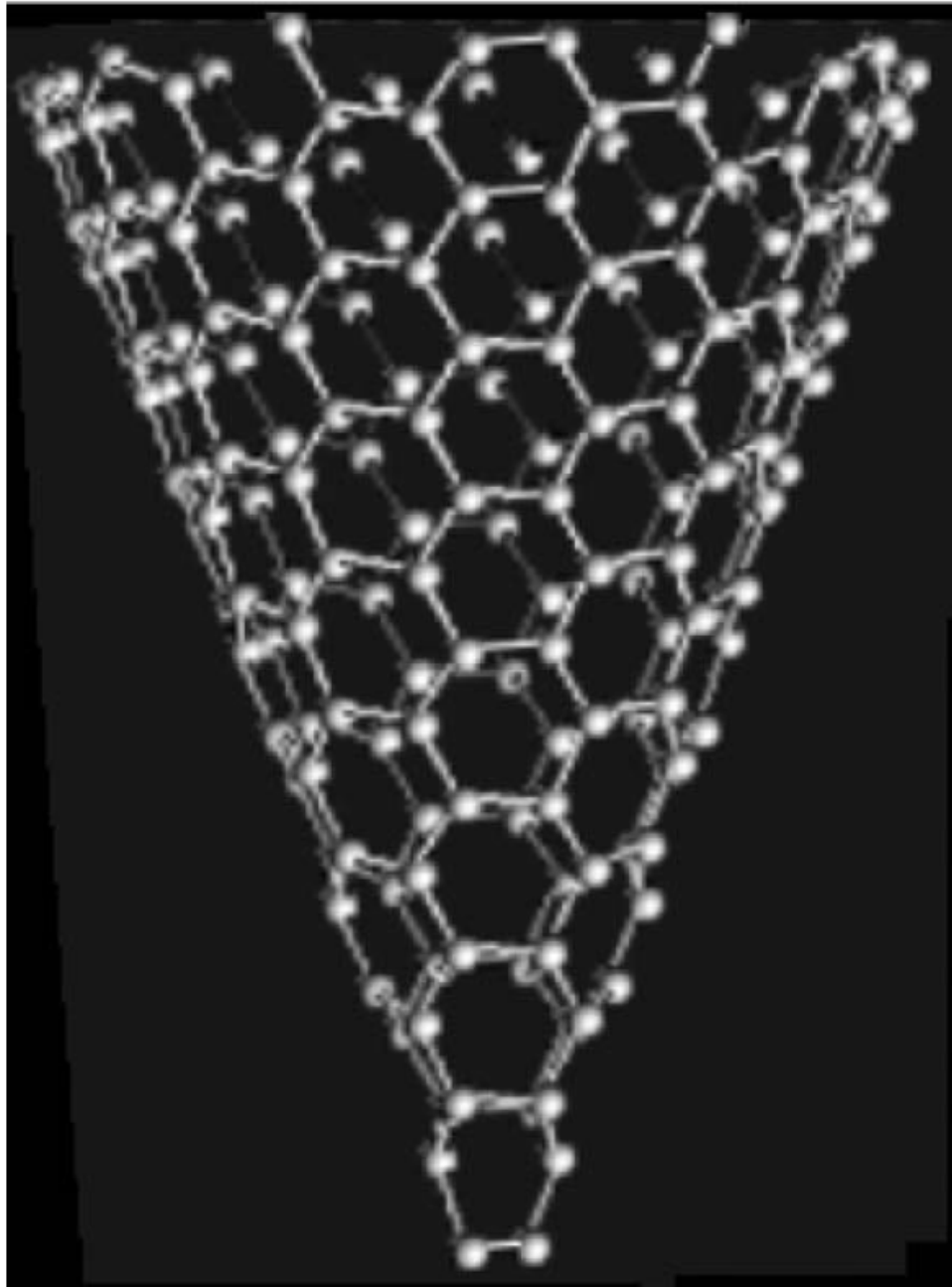


Figura 3.3 Nanoconos

Fuente: Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking.

3.2.8 Puntos Cuánticos

Los avances tecnológicos de las últimas dos décadas, han abierto una ventana de oportunidades para diseñar y controlar estados electrónicos en sistemas nuevos. Los puntos cuánticos (QDs) son “cajas” en una escala nanométrica para retener o liberar electrones selectivamente [54, 55]. Ellos son pequeños dispositivos físicos que contienen una “pequeña gota” de electrones libres [56]: pequeñas cajas de metal o semiconductor que retienen un número específico de electrones (el número puede ser ajustado desde cero hasta cientos, cambiando el estado electroestático del punto). Ver figura 3.4. Los QDs son un grupo de átomos tan pequeños, que la adición o la eliminación de un electrón cambiarían sus propiedades de manera significativa [57]. Los QDs son estructuras semiconductoras donde la función de onda de electrones es confinada en las tres dimensiones por las barreras de energía potencial que forman los límites del QD [58]. Específicamente, los QDs son estructuras semiconductoras que confinan los electrones y huecos a un volumen del orden de 20 nm^3 (o un poco más grande en algunos casos). Estas estructuras son similares a átomos, pero ellas son de un orden de magnitud mayor. Por lo tanto, usando técnicas a nanoescala es factible la manipulación de sus funciones de onda cuánticas; con esta habilidad, se pueden desarrollar aplicaciones prometedoras, como compuertas lógicas cuánticas [59].

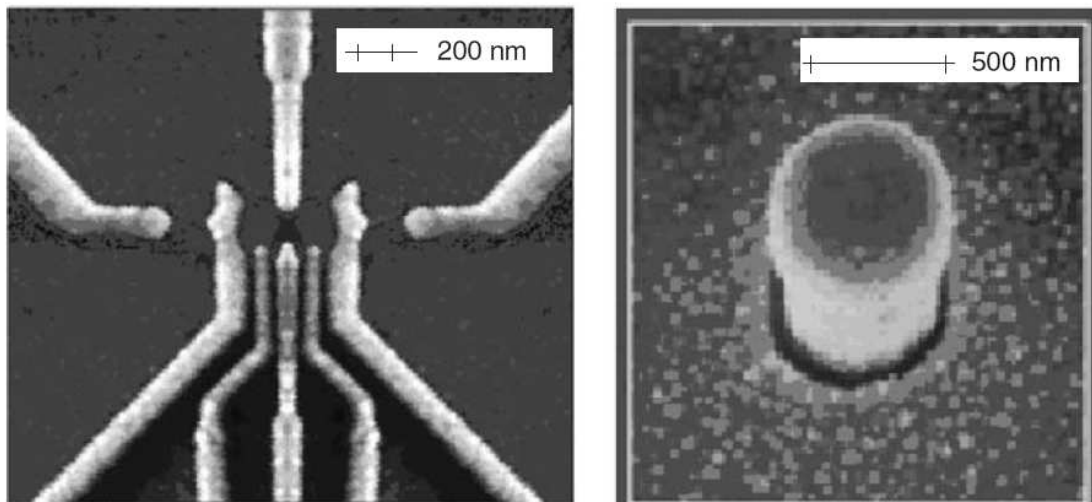


Figura 3.4 Punto Cuántico
Fuente: Kavli Institute of Nanoscience Delft.

Las técnicas modernas de procesamiento semiconductor, permiten la creación artificial de confinamiento cuántico (confinamiento cuántico en todas las tres dimensiones) de solo algunos electrones; estas sistemas QD de fermiones finitos, tienen mucho en común con los átomos, sin embargo son estructuras hechas por el hombre, diseñadas y fabricadas en un laboratorio [60]. La fabricación de QDs en dispositivos semiconductores ha llevado a la invención de transistores de un solo electrón y a emisores controlables de un solo fotón; tales “átomos de diseñador” son configuraciones para el control y manipulación de estados electrónicos [50]. Como se señaló, los QD son pequeñas estructuras semiconductoras o metálicas, donde los electrones están confinados en todas las dimensiones espaciales; como consecuencia, la discretización de la energía y el

surgimiento de la carga- por esta razón los QD son a menudo referidos como átomos artificiales. A diferencia de los átomos reales, regímenes diferentes se pueden estudiar mediante el cambio continuo del potencial externo aplicado. Un arreglo de QD puede ser considerado una molécula artificial o un cristal artificial [61]. Específicamente, la física de los QD, muestra muchos paralelismos con el comportamiento natural que ocurre en los sistemas cuánticos en la física atómica y nuclear. Como en un átomo, los niveles de energía en un QD se vuelven cuantizados, debido al confinamiento de los electrones; a diferencia de los átomos, sin embargo, los QD se pueden conectar fácilmente con los electrodos y son por consiguiente excelentes herramientas para estudiar propiedades atómicas [62, 63].

Los puntos cuánticos son sistemas prometedores, debido a sus propiedades físicas, así como sus aplicaciones potenciales en los dispositivos electrónicos. La respuesta electrónica de un QD, como en un átomo, se manifiesta en su espectro de energía discreta, el cual aparece cuando los pares electrón-hueco están excitados; aunque la función de la onda de un electrón del QD y su correspondiente hueco se extiende a lo largo de miles de átomos enrejados, el par se comporta de manera coherente y cuantizada. Los elementos de QD pueden ser usados por la siguiente generación de dispositivos de telecomunicaciones y se pueden incorporar en circuitos ópticos para aplicaciones de procesamiento de alta velocidad en redes de enrutado óptico. Los investigadores creen que si los QD pueden ser integrados en un chip, sus propiedades eléctricas únicas pueden ser puestas para realizar las funciones similares a la de los transistores convencionales, requiriendo solo una pequeña fracción del espacio; por lo tanto, los QD pueden permitir una mayor integración en los chips, con el fin de hacer computadores más poderosos. Los QD autoensamblados también pueden actuar como láseres: avances recientes en láseres de QD validan que los QD autoensamblados proveen la oportunidad de desarrollar nuevos dispositivos electrónicos y optoelectrónicos [64].

El tamaño y la forma de las estructuras de los QD y por consiguiente, el número de electrones que ellos contienen, pueden ser controlados en forma precisa; un QD puede contener un solo electrón o una colección de varios de miles de electrones. El tamaño, la forma, y la composición de los QD pueden ser adaptados para crear una variedad de propiedades deseadas; estos “átomos artificiales” complejos pueden ser posicionados y ensamblados, que sirven como nuevos materiales.

Compuestos de QD pueden ser usados para la siguiente generación de dispositivos, para telecomunicaciones y pueden ser incorporados en circuitos de ondas luminosas planas, para aplicaciones de procesamiento de señal de alta velocidad en redes de enrutamiento óptico. Los QD pueden ser utilizados para fabricar láseres de telecomunicaciones que pueden operar bien a una relativa alta temperatura (eliminando la necesidad de enfriar el láser, lo cual incrementa el costo del sistema): los láseres de QD pueden operar a 100 °C. Los QD también pueden ser usados para la tecnología de la información (IT). Las IT tradicionales están basadas en procesos incoherentes, en dispositivos semiconductores convencionales. Para facilitar las futuras IT basadas en la cuántica, que se basa en el fenómeno coherente, en un nuevo tipo de “hardware”, el cual es necesario. Los QD semiconductores prometen ser los candidatos para las unidades básicas para el procesamiento de información cuántica [2].

3.2.9 Diamante Ultrananocristalino

El diamante ultrananocristalino (UNCD), usa una forma de diamante industrial, captura varias de las mejores propiedades de los diamantes naturales en forma de una película delgada. El UNCD tiene propiedades únicas que no se pueden hallar en otros materiales a base de carbono y puede ser considerado un nuevo alótropo de carbono junto con el diamante, grafito y fullerenes. El UNCD está siendo evaluado para ser aplicado en una variedad de aplicaciones que incluyen MEMS (MEMS ópticos y de RF, BioMEMS), fuentes de electrones de cátodo frío, sellos para bombas en procesos químicos, electrodos biométricos, entre otros. El UNCD es extremadamente duro, durando 10000 veces más que el silicio en dispositivos MEMS [65].

3.2.10 Nanodiamantes (Diamondoids)

Los nanodiamantes, son moléculas de diamantes que poseen el mismo marco rígido que el carbono en forma de diamante, haciéndolos materiales atractivos para la construcción a escala manométrica y de otras aplicaciones. El adamantano ($C_{10}H_{16}$) es el más pequeño miembro de la familia de los nanodiamantes, que consiste en una subunidad de cristal de diamante. El diamantano contiene dos subunidades de cristal de diamante y el triamantano contiene tres. Recientemente, los investigadores descubrieron un gran número de miembros de esta clase de compuestos. Estos son conocidos como Diamondoids de alto nivel. Estos nanodiamantes incluyen tetramantanos a través de undecamantano, de 1 a 2 nm de diamantes hidrógeno-terminados, conteniendo 4-11 subunidades de cristal de diamante de cara fusionada. Estas moléculas abarcan una variedad de formas 3D, incluyendo barras, hélices, y discos, surgiendo de maneras diferentes de subunidades de cristal de diamante de cara fusionada. La expectativa es que Diamondoids de alto nivel, hagan posibles nuevas en el campo de las aplicaciones y la óptica, empleando polímeros, películas y cristales [66].

3.2.11 Películas Delgadas

A una escala nanométrica, las películas delgadas son estructuras 2D. Los nanocompuestos de películas delgadas están típicamente compuestos de granos de nanocristales con tamaños en el rango de 3-10 nm de un duro material cerámico en una matriz de un material cristalino o amorfo. Las películas de nanocompuestos delgados ofrecen una variedad de oportunidades para control estructural: la estructura puede ser adaptada, no solo a nivel molecular, si no también a escalas intermedias. Esto ofrece el potencial de control jerárquico similar a las más sofisticadas morfologías presentes en materiales sintetizados por la naturaleza [67]. Por ejemplo, la arquitectura de la madre de perla, consiste en tabletas alternadas de aragonito (unos cientos de nanómetros de denso) y películas delgadas orgánicas, dan al caparazón del molusco una fuerza excepcional sin la fragilidad asociada con fases inorgánicas puras.

Hay un gran número de aplicaciones potenciales para las películas delgadas de nanocompuestos en las áreas de: nuevas pinturas, revestimientos, barreras de difusión y películas funcionales de polímeros; también, una gran variedad de estrategias de procesamiento son posibles, incluyendo fundición solvente, suspensión acuática y curado UV, y termal [67]. Por ejemplo, hay un gran interés en estudiar estructuras de películas delgas óxido/ferroeléctricas que están nanomodeladas y/o composición

clasificada. Las propiedades de estas películas ferroeléctricas se espera que tenga un gran impacto tecnológico en aplicaciones como memorias de acceso aleatorio dinámico (DRAM), RAM no volátil (NVRAM), toma de imágenes térmicas, displays piezoeléctricas, almacenamiento de datos electrónicos [68], sensores, transcapacitores, y MEMS.

Las películas delgadas inorgánicas y orgánicas incluyen:

- ✓ Películas delgadas biomiméticas e interfaces orgánicas/inorgánicas.
- ✓ Películas de polímero en sustratos inorgánicos.
- ✓ Polímero modelado y películas inorgánicas en sustratos inorgánicos.
- ✓ Monocapas orgánicas y películas orgánicas/orgánicas nanolaminadas.
- ✓ Películas inorgánicas en inorgánicas y microlaminados.

3.2.12 Nanoespuma

Recientemente, los investigadores anunciaron que ellos han creado una nueva forma de carbono: un sólido esponjoso que es extremadamente liviano y es atraído por los imanes. La nueva estructura fue creada cuando físicos bombardearon un objetivo de carbono, con un láser capaz de disparar 10000 pulsos por segundos. A medida que el carbono alcanza temperaturas alrededor de 10000 °C, este forma una tela de tubos de carbono, cada uno con 1 nm de diámetro [2].

3.2.13 Nanoclusters

Las partículas metálicas y semiconductoras a nanoescala son de interés, porque ellos marcan un rango de transición del material, entre lo cuántico y las propiedades en magnitudes grandes. Con el decrecimiento del tamaño de la partícula, las propiedades en magnitudes grandes se pierden a medida que los estados electrónicos continuos se vuelven discretos (el efecto cuántico del tamaño) y a medida que la fracción de los átomos superficiales llega a ser grande. Las propiedades electrónicas y magnéticas de nanopartículas metálicas y nanoclusters tienen nuevas características que pueden ser utilizadas en aplicaciones nuevas. Aplicaciones que van desde conmutación óptica no lineal y catálisis, hasta el almacenamiento de información de alta densidad. Un número de métodos se ha desarrollado para sintetizar las nanopartículas metálicas, pero siguen existiendo grandes desafíos con el escalamiento de estos métodos [69].

4.0 GENERALIDADES DE LA NANO ELECTRONICA

Para una transición posible se precisa que la investigación reciente en el campo de la electrónica a nivel nanoescala se ha centrado en dos temas fundamentales: (a) los principios de funcionamiento de los dispositivos en la escala reducida y (b) esquemas que llevan a su realización e integración eventual en los circuitos útiles [70].

A continuación se describen algunos campos de interés en la nanotecnología[71]: la nanoingeniería y nanodiseño-nanomáquinas, nanoCAD, nanodispositivos, circuitos de: (i)

lógica de la nanoescala; (ii) nanoelectrónica nanoelectrónica-molecular y de cómputo, estados electrónicos, puntos Cuánticos, nanoalambre; (iii) características nanomagnetismo-magnéticas de nanoestructuras y de los materiales nanoestructurados; y (iv) aspectos computadora-teóricos Cuánticos, métodos computacionales para simular las computadoras cuánticas, dispositivos y algoritmos. Los Nanocientíficos que trabajan en esta parte están intentando crear nuevas comprensiones y estructuras de la dinámica de las materias primas y de sus moléculas; se intenta mejorar los dispositivos existentes, tales como transistores y hacerlos más pequeños de la ingeniería [22].

De acuerdo a lo anteriormente descrito, el escalamiento exponencial de la tecnología estándar basada en silicio, acabará eventualmente: mientras que se espera que el escalamiento continúe en esta década y parte de la próxima; las tecnologías alternativas se pueden requerir (y se están buscando) para sostener otras mejoras. La Nanoelectrónica y particularmente los dispositivos del nanoelectrónicos tales como dispositivos del solo-electrón, dispositivos mecánicos del túnel del cuántico y nanoelectrónica de spin, entre otros, pueden a su debido tiempo, poder continuar la marcha de minituarización. Las subdivisiones siguientes que siguen el recubrimiento de estas tecnologías se basan en la clasificación hecha en [72].

4.1 Dispositivos Simple Electrón

A pesar que los transistores CMOS, ahora tienen pequeñas longitudes en la puerta (aproximadamente de 50-100 nanómetros), el número de electrones que se emplean en una operación de conmutación son todavía grandes (en el orden de los diez millares). Un acercamiento (Esta es la filosofía básica de los transistores del solo-electrón [SETs]), es reducir el flujo al punto donde se utiliza solamente un electrón; esto implicaría que la energía requerida para cambiar, es mucho más baja que la que necesita actualmente. Los dispositivos SET podrían ser los sucesores potenciales a la tecnología convencional empleada para fabricar los MOSFETs. Los sistemas hacen uso de la unidad más pequeña de carga eléctrica, el electrón, para representar los bits de información. Mientras que el electrón que hace un túnel en MOSFETs limita su escala usable más pequeña de la fabricación, este mismo fenómeno en dispositivos SET puede ser útil en alcanzar el nivel siguiente de la miniaturización.

Los dispositivos semiconductores SET del orden Nanoescala, consisten en un punto cuántico del semiconductor (QD) sostenido entre dos plomos metálicos (véase Fig. 4.1 como ejemplo). El sistema metálico fue desarrollado a los finales de los 80 y se considera uno de los tipos más simples de átomos artificiales. Un SET metálico consiste en una partícula del metal aislado de sus plomos con dos ensambladuras de túnel (que son similares a los diodos) y capacitancia juntado a un electrodo de puerta común. Las ensambladuras del túnel crean una isla de cargas, donde los electrones pueden entrar solamente haciendo un túnel con uno de los aisladores. La repulsión de la carga prohíbe

más de un electrón a la vez en la isla (cerca de la puerta). Por lo tanto, los circuitos electrónicos se pueden hacer para bombear o contar electrones uno a la vez. Una resistencia eléctrica SET está altamente sensible a los campos eléctricos de las cargas próximas, puede detectar fácilmente también cargas tan pequeñas del 1% del campo eléctrico de un electrón. La corriente en función de la diagonal a través de las barreras del túnel, son también medibles, para observar la supuesta escalera de cargas, en un aumento de manera gradual de la corriente mientras que los electrones se agregan a la partícula del metal [22]. Algunas de las técnicas de búsqueda de los investigadores a superar, incluye los problemas asociados a las fluctuaciones de la carga cuántica y de la sensibilidad del SET a la radiación de la microonda. Los SET exhiben extremadamente bajo consumo de energía, dimensiones reducidas del dispositivo, control actual y de excelente poco ruido, que prometen llevar innovadores dispositivos electrónicos [22]. Los usos incluyen los sistemas de especialización métricas de la escala (e.g., los estándares actuales y los electrómetros de la precisión); redes de los nervios de alta densidad, memoria de computadora de alta densidad y sistemas informáticos

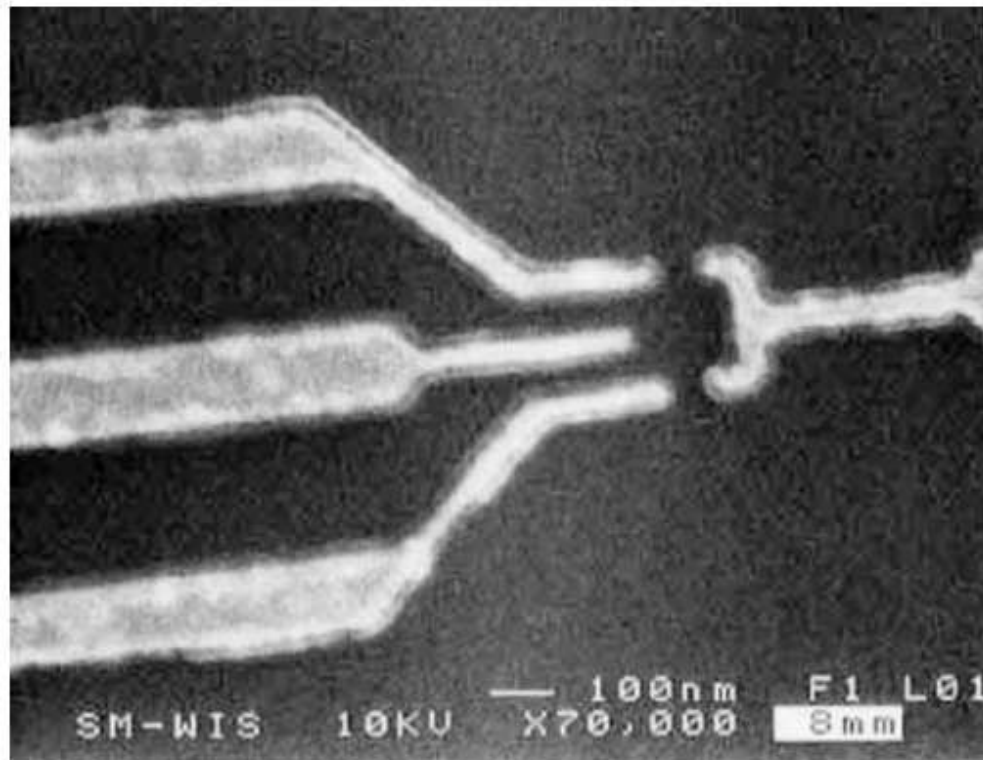


Figura 4.1 Ejemplo de un Transistor Simple - Electrón
Fuente: Quantum-Effect Devices

Group of the Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology

Según lo observado, un SET consiste en una isla de metal, de unas centenas de nanómetros, juntado de dos plomos al metal, a través de las barreras del túnel. A

temperaturas por debajo de 1 K, ninguna corriente puede pasar a través de la isla, cuando se aplica una baja tensión a los diagonales. Este efecto se conoce como el bloqueo de las cargas, que es el resultado de las interacciones repulsivas del electrón-electrón en la isla. El interés de esto es el hecho de que la corriente a través de la isla se puede controlar exactamente bajo un solo electrón. Los SET son también realizables en los dispositivos de semiconductor, donde su comportamiento se caracteriza como QD. Como vimos anteriormente, los QDs son las cajas *human-made* nanómetro-clasificadas que controlan el flujo de átomos selectivamente sosteniéndolos o lanzándolos [22]. Hay varios tipos de SET. Los sistemas se pueden basar en bloqueo de cargas, memoria *Flash* miniatura o el *Yano-tipo* memoria.

La memoria tipo *Flash* miniatura, es una versión pequeña de la memoria *Flash* convencional CMOS. Aquí la adición de un solo electrón al nodo de la memoria da lugar a un cambio substancial a la corriente del electrón a través del canal del transistor. Otro enfoque es el de utilizar varios nanocristales de silicio como nodos en el óxido, antes que uno sólo; este acercamiento tiene la ventaja de ser más robusto a las fluctuaciones del solo-electrón en el sistema.

La Memoria tipo *Yano*, ha sido demostrado por K. Yano en Hitachi. La memoria tipo Yano implica la fabricación de dos alambres cruzados de poli-Si usando líneas estándar de la fabricación del CMOS. Este tipo de dispositivo de memoria utiliza los granos como nodos en la memoria. La capacidad de producir en masa tales dispositivos de memoria con el control requerido de características, puede ser sin embargo muy desafiadora.

4.2 Dispositivos Mecánicos del Túnel Cuántico

Los dispositivos del túnel de la mecánica cuántica, hacen referencia a la capacidad del túnel de pasar el electrón a través de las barreras finas, cuando la función de onda del electrón puede penetrar a través de la barrera. El grueso de la barrera debe ser menor de 10 nanómetros, para permitir una cantidad útil de corriente al hacer un túnel. Hay dos clases principales de dispositivos que utilizan al hacer un túnel de mecánica cuántica, para producir una característica de corriente-voltaje negativa, por la diferencia de resistencia que se pueda poner, para utilizar en un número de usos de circuito: diodos que hacen un túnel resonante (RTDs) y diodos de Esaki. En la figura 4.2, se puede observar la clásica vista de un electrón para superar ó no la Barrera. La Mecánica cuántica permite ver un túnel de electrones a través de una Barrera [115].

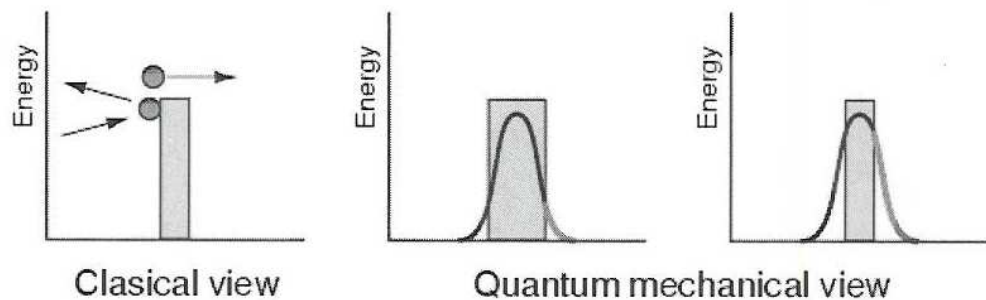


Figura. 4.2 Vista clásica de un electron
Fuente: http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/chpt_2/14.html

Una RTD, es un dispositivo con dos electrodos (un electrodo “izquierdo” y uno “derecho”), con dos barreras de túnel entre los electrodos. El pozo (electrónico) cuántico (QW) es creado por el confinamiento de la función onda-electrón, la cuales entre las dos barreras genera un sistema discreto de estados de energía permitidos en la cuántica del electrón. Cuando (y solamente cuando) un electrón del electrodo “dejado”, tiene una energía que corresponde al estado cuántico permitido en el pozo, tal electrón mecánicamente en el túnel cuántico pasa a través de las dos barreras y alcanza el electrodo “derecho”. Un pico de corriente se forma cuando los dos electrodos se alinean después de aplicar un voltaje entre los electrodos; una vez que la tensión adicional es aplicada, los electrones no permiten que los estados cuánticos hagan un túnel a través de ellos y sus partículas actuales. Los mejores resultados para los dispositivos RTD se obtienen al usar sustancias del INP/de InGaAs/InAlAs, pero dado que el silicio es el material dominante en la electrónica y es substancialmente más barato para fabricar algunas otras sustancias, ha habido interés en un sistema de base-silicio, sin embargo, los diodos de base-silicio han demostrado hasta ahora densidades corrientes máximas pobres y el pico-a-valle de cocientes actuales. El funcionamiento típico de la RTD se resume en la Figura 4.3

Parameter	High-Speed InP RTD Logic	Predicted High-Speed Logic	Low-Power InP RTD Memory	Predicted Low-Power Memory	Nanometer Scaled RTDs	SiGe RTD	SiGe Interband Tunnel Diode
Peak-to-valley current ratio	4	3	2	3	3	3.3	5.45
Peak current density (A/cm ²)	40k	10k	0.16	0.1	10k	25k	8k
Minimum feature size	2 μ m	200 nm	500 nm	200 nm	50 nm	14 μ m	14 μ m
Peak voltage	0.35	0.16	0.20	0.20	0.20	1.5	0.28
Maximum clocking frequency	12.5 GHz	6.25 GHz	592 kHz	56.8 MHz	6.25 GHz	NA	NA
Time constant	0.02 ns	0.04 ns	422 ns	4.4 ns	0.04 ns	~0.02 ns	~0.31 ns

Figura 4.3 Parámetros de la RTD

Fuente: Cortesía de D.J. Paul Cavendish Laboratory.

Hasta la fecha los diodos de túnel representan la poca tecnología del dispositivo cuántico, que ha demostrado con éxito la operación del circuito a temperatura ambiente. Por ejemplo, se ha visto que el túnel células de memoria de SRAM basados en InP usan dos RTDs y un FET; la lógica genérica puede cambiar su funcionalidad entre el NAND, NI, o NO cambiando los tamaños relativos de los transistores. Esta operación del circuito ha demandado hasta 12 Ghz. La Doble-corriente RTDs máxima, también se ha utilizado para demostrar que la lógica polivalente, permite una reducción substancial del dispositivo para los chips. Los dispositivos RTD se han utilizado para mostrar una gran cantidad de circuitos, que proporcionan la disipación de una energía más baja o de velocidades más alta, que las tecnologías convencionales del FET del CMOS o de III-V actualmente.

El diodo de Esaki (descrito por Leo Esaki en 1958) es un dispositivo del Inter bandas donde los electrones hacen un túnel en la banda de conducción a los estados de agujero en la banda de la valencia. Los dispositivos que se produjeron en un principio, fueron fabricados fundiendo una especie de dopaje para crear el diodo de perno; esto da lugar a una uniformidad pobre y al control pobre del funcionamiento. Los avances recientes con el uso del crecimiento epitaxial han dado lugar a mejores resultados del funcionamiento y a buena uniformidad [2].

4.3 Nanoelectrónica SPIN (*Spintronics*)

El Spin “giro” de un electrón se puede utilizar para el almacenaje en memoria o la lógica computacional. Los discos duros en computadoras proporcionan un ejemplo de cómo las

vueltas se pueden utilizar para almacenar la información; esto se hace con la medición ferromagnética de una partícula polarizada.

Spintronics está en una etapa relativamente madura de la investigación y puede (pronto) permitirá funciones de memoria y de lógica en sistemas mucho más pequeños y robustos que Si CMOS.

La operación básica de un dispositivo de giro, se basa en el material ferromagnético con un mayor número de cierre en un giro a la energía Fermi o de superficie: si el material ferromagnético se pone en un circuito, entonces sólo el giro puede ser transportado a través del sistema. Por lo tanto, los conmutadores pueden ser construidos por el diseño de las estructuras con diferentes ferromagnético normal y capas metálicas. Al tener dos capas ferromagnéticas colocados a ambos lados de un metal y si ambos ferromagnéticos son polarizados en la misma dirección, entonces la mayoría girará en el sistema, tendrá una baja resistencia en la trayectoria a través del dispositivo; sin embargo, si el ferromagnetismo se ha opuesto su polarización, entonces, tanto la minoría como la mayoría girará a través de una alta resistencia en su trayectoria.

Este tipo de efecto puede ser usado para producir un dispositivo de giro tipo túnel. Si dos contactos ferromagnéticos se colocan a ambos lados de un metal (o semiconductores) y aplicando un voltaje de polarización al sistema, este se inyecta en la capa metálica de los electrones de un spin particular. Si el segundo contacto con el metal tiene el mismo spin polarizado como en la primera, entonces los electrones pueden pasar a la segunda y ponerse en contacto con el circuito en baja resistencia. Sin embargo, si el segundo contacto es opuesto a la polarización del primer contacto, no existirán libres los estados cerca de la superficie de Fermi de energía, para los electrones “en el túnel”, por lo tanto, en el actual sistema no fluiría nada.

Si el metal se sustituye por un semiconductor, entonces la aplicación de un campo eléctrico en los sectores de los semiconductores causaría una rotación del spin de los electrones, que son transportados a través de la capa del semiconductor, entonces el dispositivo podrá conectarse y desconectarse mediante una puerta eléctrica sobre el dispositivo. Estos efectos se pueden utilizar para formar una serie de *spintronic* de diferentes dispositivos, incluyendo conmutadores y spin-filtros polarizados.

El dispositivo nanoelectrónico imán, de mayor éxito hasta la fecha es la magnética memoria de acceso aleatorio (MRAM).

Se han producido una serie de memorias con la capacidad superior a 1 MB y los tiempos de acceso de cerca de 50 ns, con dimensiones de 250 nm. Estos dispositivos pueden ampliarse fácilmente a dimensiones más pequeñas, donde su rendimiento se prevé que aumente de manera sustancial. Hasta la fecha sólo ha habido unas pocas manifestaciones de la inyección de spin en semiconductores. En concreto, un spin-luz polarizada de emisión de diodo, ha demostrado que la producción de fotones polarizados en función de la rotación de los electrones y agujeros en el sistema de inyección de giro considerable, sólo puede lograrse a partir de semiconductores magnéticos, (los resultados de ferromagnetismo metálicos en los semiconductores hasta la fecha ha sido escasa) [2].

4.4 Nanoelectrónica Molecular

En el último par de décadas una gran cantidad de atención se ha enfocado en la investigación de las moléculas como un potencial futuro en los componente de los dispositivos electrónicos; esta investigación está motivada, por la posible reducción económica y por la reducción al mínimo de los actuales dispositivos electrónicos con sus limitaciones físicas de estado sólido, incluyendo entre otras cosas, la complejidad y los costosos procesos de litografía, fluctuaciones del dopaje y la corta inversión del canal efecto [73]. La electrónica molecular es potencialmente una interesante alternativa a la electrónica tradicional basados en los semiconductores de silicio, debido a que el proyecto de estructuras moleculares electrónicos ocupan un área inferior a mil veces la zona que actualmente se utilizan en el semiconductor de estado sólido, en los circuitos integrados [73]. La Principales estructuras de interés incluyen: (i) las moléculas como alambres / interruptores y (ii) rectificadores de corriente, diodos, la rectificación de diodos y diodos de túnel resonante.

La principal alternativa de los nanodispositivos, se basa en el control del movimiento de electrones individuales en las estructuras de estrato sólidos, las cuales ofrecen algunas ventajas potenciales sobre la tecnología CMOS, con una amplia elección de los materiales. Sin embargo, las dimensiones críticas de los transistores del solo-electrón para la operación a temperatura ambiente, deben estar debajo de ~1 nanómetro, demasiado pequeños para la corriente e incluso para las próximas técnicas litográficas, tales como la radiación ultravioleta y haces electrónicos extremos. [116].

Muchos físicos e ingenieros creen que esta crisis inminente se puede resolver solamente por un cambio radical del paradigma puramente de la tecnología del CMOS, al semiconductor híbrido, de los circuitos moleculares, que el grupo de la Universidad Estatal de Nueva York Stony Brook lo ha nombrado como: CMOL, una combinación molecular y CMOS. (Véase figura 4.4) [116].

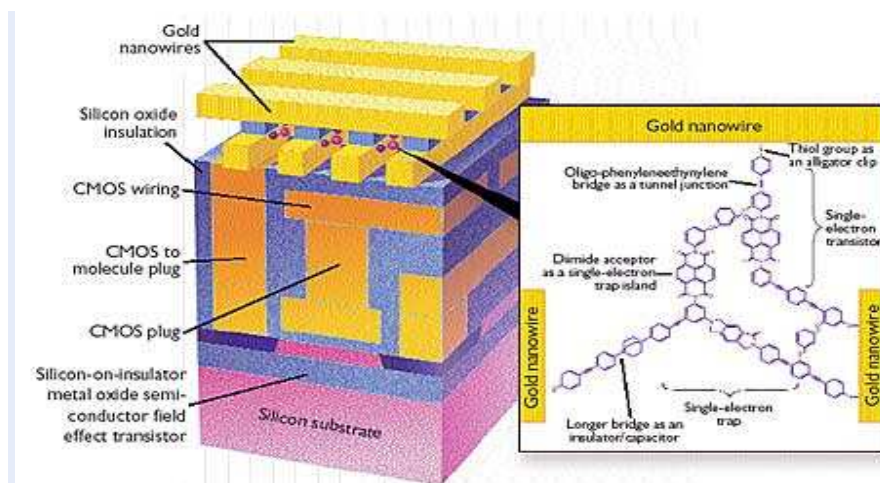


Figura 4.4. Este híbrido complementario de óxido metálico semiconductor / Circuito Molecular contiene una molécula que puede funcionar como un interruptor de enganche (incluidos un único bit de memoria celular) controlada por dos señales de entrada. Fuente: University of NY Stony Brook.

Los estudios que el grupo de la Universidad Estatal de Nueva York Stony Brook ha llevado a cabo en las *Redes Noeuromorphic*, han demostrado que este dispositivo, trabajando junto con los transistores de la capa del CMOS, puede permitir la creación de una variedad amplia de circuitos integrados altamente funcionales. Una familia de redes neuromorphic distribuidas en una barra transversal, que han llamado *CrossNets*, la cual parece especialmente prometedora. Cada CrossNet (ver figura 4.5) es esencialmente un campo grande de azulejos similares (o de “plaquetas,” mostrado en verde), que ahora y después es interrumpido por los contactos “células grises” situadas en la capa subyacente del Cmos. Esto se inspiró en una arquitectura biológica, el servicio de los interruptores de enganche (mostrados como círculos verdes con las flechas) como “sinapsis adaptantes” que conectan los nanoalambres “axonic” (mostrados en rojo) y los nanoalambres “dendríticos” perpendiculares mostrados en azul. Las células grises, que son esencialmente amplificadores diferenciales no lineales, servicio como “somas,” o cuerpos de célula de los nervios. [116].

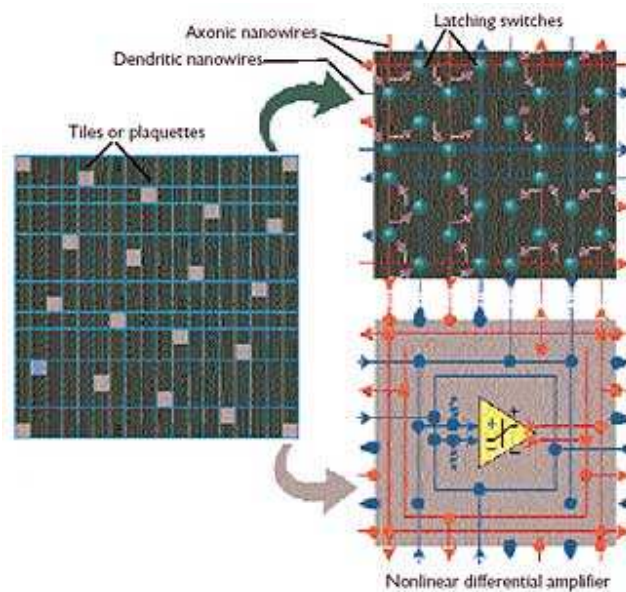


Figura 4.5. Una matriz nanoalambre de molécula e interrumpida después por contactos con las células de Semiconductores, forma una red distribuida travesaño. Fuente: *University of NY Stony Brook*.

La motivación para el uso de redes de neuromorphic proviene de la conocida comparación del desempeño de los actuales computadores digitales con los sistemas neuronales biológicos, de una de las tareas más simples: el reconocimiento de imágenes (ó, más precisamente, la clasificación de imagen). [116].

La Nanoelectrónica molecular fue propuesta por Aviram y Ratner en 1974, como una manera de producir un rectificador de moléculas orgánicas. El primer ejemplo de un único dispositivo electrónico molecular apareció en 1990. Varios enfoques han sido estudiados en los últimos años. El principal desafío se refiere a la dificultad de hacer los contactos eléctricos en las moléculas, que son sólo unos pocos nanómetros de tamaño. El desarrollo del microscopio de barrido de túnel (STM) permitió los primeros avances en este campo y ha seguido siendo una de las principales herramientas para la caracterización de las moléculas individuales.

Otro enfoque de la electrónica molecular es el uso de moléculas orgánicas. Las Universidades de Yale y de Carolina del Sur, han informado sobre la conducción a través de una molécula de Benceno que se adjunta a dos electrodos de oro utilizando grupos de Tiol, obligados por los electrones de la molécula para el oro. Los anillos de Benceno se han deslocalizado fuera del plano de la molécula a través de la cual los electrones pueden ser transportados cuando una parte se aplica a través de la molécula. Las dobles y triples moléculas de carbono-carbono en el plano facilitan este tipo de órbitas, por lo tanto, las combinaciones de estas moléculas de polisulfuro, crean la realización de los alambres que hoy se conocen como *Tour de cables* (a nombre de James Tour). Las moléculas se pueden entonces diseñar con las secciones que las conducen. El funcionamiento molecular de las RTDs a la temperatura ambiente se ha demostrado. La compañía *Miter Corporation* también ha investigado en las posibles arquitecturas (Ver figura 4.6), utilizando moléculas orgánicas. Una serie de planos y modelos se han basado en la lógica del diodo, utilizando el Tour cables y diodos, complementando con los diseños de las puertas AND, OR, XOR. El principal problema con estos sistemas orgánicos es que la conductividad es relativamente pobre a través de la interconexión de los cables Tour (el RC que es una constante de tiempo de la mayoría de los dispositivos, es probable que sea relativamente grande, y, a menos que los conductores o mejor arquitecturas para las cuales el rendimiento no depende sobre la resistencia se puede encontrar, los sistemas orgánicos será siempre mucho más lento que el silicio).

Para poder utilizar las moléculas en la electrónica futura, las estructuras enteras tendrán que ser reducidas proporcionalmente, incluyendo los alambres que conectan cada componente. Por lo tanto, es esencial desarrollar los “alambres moleculares.” Un grupo interesante de moléculas es los que consisten en las cadenas de los anillos de benceno aromáticos, tales como polifenilenos, polipropilenos, y polythiophenes. Varios investigadores han demostrado que las moléculas de este tipo conducen la corriente y que son capaces de realizar pequeñas conmutaciones [74, 75].

Los rectificadores de metal-nanotubo, hasta la fecha, no se han producido ningún interruptor o dispositivos de tres terminales, que son requisitos básicos para la mayoría de las arquitecturas lógicas. Algunos investigadores han demostrado que las mediciones de nanocristales, por ejemplo, CdSe nanocristales pueden ser preparadas con tamaños de hasta alrededor de 2 nm y con un enlazador de moléculas, que pueden adjuntar a las

numerosas superficies, incluyendo el oro. Se ha demostrado que un transistor de single-electrón, utiliza un sustrato de silicio oxidado mientras que una puerta de un nanocrystal de CdSe colocada entre dos electrodos del oro en la superficie SiO₂.

También se han realizado esfuerzos en el logro de la medición de la conductividad y en los diferentes tipos de ADN. Los resultados van desde el comportamiento altamente aislante a semiconductores e inclusive el comportamiento metálico. Los mejores resultados hasta la fecha corresponden a las nanopartículas "Pd" [101], adjunto a un filamento de DNA que ha mostrado una conductividad de 100 Sm⁻¹. Hay un gran número de muchos otros enfoques que se discuten en la literatura. Hasta la fecha, sin embargo, no ha habido ninguna demostración de un transistor molecular o de cualquier estructura de ganancia.

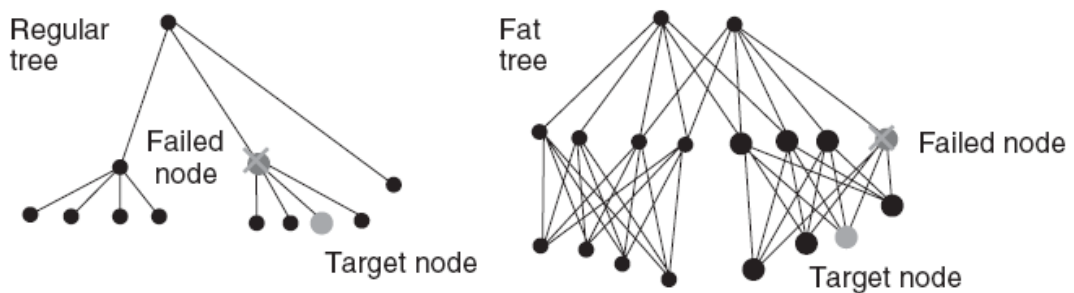


Figura. 4.6 Ejemplo del diseño del árbol grueso
Fuente: *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*

4.5 Tolerancias a Falla de Diseños

Una de las principales razones para el elevado costo de las plantas de fabricación de CMOS, es que la arquitectura litográfica requiere de inicio a fin técnicas de fabricación no tolerantes por defecto:

Cualquier transistor de interconexión o falla en el circuito, potencialmente destruye todo el chip. Algunas redundancias pueden ser construidas en el diseño, pero este enfoque viene acompañado de algunos gastos. Este problema es más grave para las aplicaciones específicas de los circuitos integrados (ASIC), ya que cada aplicación tiene un diseño de circuito diferente, a diferencia de las memorias o diseños de microprocesadores en masas repetitivas. Estas pruebas representan un costo sustancial, en torno a dos tercios del total de chips de desarrollo y los costos de fabricación: un nuevo circuito de diseño debe ser probado para verificar que no se cometan errores en el circuito de diseño o en la fabricación de máscara, que se haya producido. Con hasta 20 niveles de la máscara en algunos chips y con un máximo de 300 millones de transistores en los diseños, la posibilidad de errores en algún momento en el diseño y proceso de fabricación, esta no sería trivial.

Los dispositivos Nanoelectrónicos todavía se basan en elementos que no tienen tolerancia a fallas intrínsecas. Por lo tanto, la cuestión es si una arquitectura puede encontrarse en que no todos los transistores o sus interconexiones sean necesarios para su correcto funcionamiento, esto con el fin de que el chip pueda seguir siendo viable en su funcionamiento. Tal como se describió en el párrafo anterior, esto podría reducir los costos considerablemente.

Uno de los pocos defectos tolerantes de arquitecturas que ha aparecido en los últimos tiempos es la *arquitectura Teramac2* [102]. Este concepto se basa en la capacidad de tener un gran número de interconexiones en un sistema, por lo que algunas rutas se pueden localizar en torno a los defectos y no la funcionalidad de las partes de un circuito. Esto es similar, en cierto modo, al concepto de un interruptor de *crossbar switch*, *Clos Network*, *Benes Network*, o de arquitectura gran árbol (éstos son diseños de redes de no bloqueo, redes que para las cuales una conexión de las fuentes a las destinaciones, pueden siempre ser realizadas sin el bloqueo).

Antes de que el sistema se ejecute, se encuentra un mapa con todos los defectos y el sistema está configurado de modo que los defectos pueden ser evitados. Por lo tanto, el enfoque construir un equipo *Teramac* es barato, el cual está permitido tener defectos, encontrar los defectos, configurar los recursos con software, compilar el programa y ejecutarse en la computadora. *Teramac* (también llamada configuración personalizada), es un prototipo de superordenador desarrollado en HP. Si bien la arquitectura de este prototipo se basa en métodos electrónicos convencionales, sus principios y enfoques son novedosos. *Teramac* consta de 864 idénticas compuesto de chips, sobre el campo de puertas programables (FPGAs). Cada FPGA contiene una gran cantidad de unidades de cómputo y una conexión de red flexible, llamado LUT y de barra transversal respectivamente. Todas las LUT son idénticas para su desarrollo físico estructural y pueden aplicar diferentes funciones lógicas, por lo que no se trata de lógica digital como un componente de puerta AND, sino más bien con la memoria. *Teramac* difiere de la arquitectura convencional, dado que su arquitectura es tolerante a los defectos. La clave de la propiedad *Teramac* es su software cambiante en arquitectura. Se ha estimado que hay 200.000 defectos en el prototipo de HP ordenador, pero aún funciona y de hecho, puede funcionar (en algunas de sus configuraciones) 100 veces más rápido que un procesador de un solo trabajo. Uno puede usar el código o instrucción para cambiar la lógica de la composición *Teramac*.

4.6 Cuántica Automata Celular

La cuántica automática celular interconectable (QCA), proporciona un método de intercambio de información y computación. QCA ha recibido mucha atención últimamente. El concepto básico se basa en cuatro (o cinco) puntos cuánticos que se producen con sólo dos electrones en el sistema. La repulsión de las cargas de los electrones les obliga a ocupar lugares diagonalmente opuestos y por lo tanto, el arreglo determina el estado de la célula si está en un "1" ó "0". En la medida en que los electrones se ven obligados a permanecer en esta celda y otras células pueden ser colocadas al lado de la primera celda. Si un campo se aplica para cambiar la disposición de los electrones en la primera

celda, esta información se pasa a las células vecinas, lo cual conlleva a que se transporten a través del sistema. Por las disposiciones pertinentes, también se puede lograr la lógica de cálculos. Hasta la fecha, sólo una única célula se ha demostrado experimentalmente (puertas de lógica no se ha demostrado).

Los cálculos sugieren que el silicio QDs de menos de 2 nm de tamaño, están obligados a producir células que pueden funcionar a temperatura ambiente. Hay cierta creencia de que el libre montaje de sistemas QD molecular, puede ser el sistema ideal para producir QCAs, el cual conllevaría a requerir un trabajo adicional. La QCA es un concepto interesante (siendo una arquitectura interconectable), a pesar que existen problemas importantes. En los cálculos se ha demostrado que los QCAs, pueden ser mucho más lento que los circuitos CMOS convencionales, relativamente para pequeñas densidades de integración.

4.7 Computación Cuántica

La computación cuántica (QuC3), es una arquitectura masivamente paralela en un nivel que no es posible en cualquier arquitectura clásica. En QuC, la información está codificada en “bits cuánticos (qubits)”, que contrasta con la lógica clásica de bits, que puede ser, en estado 1 o 0; los bits cuánticos pueden existir como una combinación (una superposición lineal), de la lógica cuántica de dos estados, representados como $|1\rangle$ y $|0\rangle$., debido a la capacidad de procesamiento paralelo, un ordenador cuántico es capaz de realizar cálculos mucho más rápido que los ordenadores clásicos.

QuC, utiliza las propiedades de interferencia de la mecánica cuántica entrelazadas en las partículas, para permitir que cada bit de información cuántico (llamado un Qubit) en el equipo, pueda ser íntimamente ligado a todos los demás Qubit en el sistema. El mecanismo de la teoría cuántica de QuC, es la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen y la desigualdad de Bell: Si dos partículas son entrelazadas y llevadas a los extremos opuestos del universo, esta determinaría las medidas de las propiedades de una partícula, entonces automáticamente se conocería las propiedades de los demás partículas, debido a que están íntimamente relacionadas. El estado de uno después de una medición automáticamente define el estado de los demás, esto es como si la información hubiese viajado instantáneamente a través de la distancia del universo, lo cual es imposible en la teoría de la relatividad especial de Einstein. Un ejemplo de ello es la vuelta de un fotón; si un fotón tiene una polarización derecha, entonces el otro fotón después de entrelazarse, debe tener una polarización izquierda a través de la teoría cuántica.

Desde un punto de vista físico un bit tiene dos estados en el sistema. En la mecánica cuántica estos dos estados son distinguibles, entonces también puede existir una superposición de estos dos estados, llamado Qubit. Si cada una de estas superposiciones es entrelazada, entonces habrá un modo mayor de superposición de cada uno de los Qubit, por lo tanto el estado de cada uno de los Qubit depende de los estados de todos los demás Qubit. La puerta de las operaciones sobre estos qubits proporciona un tiempo de evolución del sistema, donde cada partícula entrelazada se ve afectada. Como resultado de ello, se obtendrá una masiva computación paralela.

Para producir un ordenador cuántico, hay que tener cinco criterios, de una lista de chequeo de llamada DiVincenzo [420], que deben cumplir lo siguiente:

1. Un sistema físico escalable con los qubits muy bien caracterizados.
2. Una simple inicialización de los estados de alineación (inicialización de los qubits a un conocido estado). Básicamente se trata de establecer los qubits en los estados cuánticos similares, antes de proceder a realizar cualquier cálculo. Como ejemplo, es el ajuste de todas las vueltas en un sistema para ser idénticas.
3. Tiempos relevantes largos de decoherencia, mucho más largo que la operación de la puerta. Como el tiempo de coherencia establece la duración de los qubits estos pueden ser atrapados, sin pérdida de cualquier información, cualquier cálculo debe ser terminado antes del lanzamiento de la información de los qubits.
4. Un conjunto universal de puertas cuánticas. Para un ordenador cuántico, dos tipos de puerta no operados son necesarios para producir un ordenador universal que puede ser diseñado y programado para completar cualquier tarea de cálculo. Estos son los únicos y dos-Qubit en operaciones, de estos sería un equipo de factorización, búsqueda en bases de datos o sistema de simulación cuántica, las cuales pueden ser construidas y operadas. Estas dos operaciones de la puerta se puede lograr por diferentes técnicas que dependen de los dos estados del sistema utilizado para cada Qubit.
5. La medición de la capacidad específica del Qubit. Una vez que el cálculo es completo, la información debe ser de la salida del qubits. Satisfacer estos criterios es un gran desafío técnico, debido a que implica ajustar dos necesidades: la necesidad de acceder a los qubits, así uno puede inicializar, manejar y leer su estado, pero al mismo tiempo, los qubits deben ser altamente aislados del medio ambiente, por lo que siguen siendo coherente durante mucho tiempo [76]. En un ordenador cuántico, los bits cuánticos tienen primero que ser controlados individualmente, a fin de inicializar el registro cuántico de la información que se almacena y un control sobre la interacción entre el quantum de bits que debe establecerse de modo que la cuantía se declare embrollada. “Entrelazamiento” es la clave para explotar la capacidad de un ordenador cuántico: En efecto, un rígido acoplamiento se introduce entre los qubits, lo que puede ya no ser considerado de forma individual, pero se ven afectados simultáneamente por una operación de cálculo. “I + D” (desarrollo e investigación) son ahora los esfuerzos encaminados a la búsqueda de un sistema físico que podría constituirse confiablemente, poco controlables en la cuántica [77].

El QuC está actualmente en etapas “inmaduras” fase experimental, pero si muchos de estos problemas se pueden superar, el potencial del poder de la técnica permitirá muchos cálculos numéricos intensivos, dado que en la actualidad es imposible de resolver muchos problemas con los ordenadores clásicos.

Hasta el cierre de esta investigación sólo unos pocos sistemas con hasta 7 qubits, se han demostrado. Para la mayoría de las aplicaciones, tales como factorización de grandes números en la criptografía, 30000, o qubits son necesarios, aunque 50 qubits rápidamente podrían resolver estos problemas, los cuales son muy lentos en los ordenadores clásicos. Las trampas Ion y la resonancia magnética nuclear de sistemas hasta la fecha han demostrado el mayor número de Qubit entrelazados.

5.0 GENERALIDADES DE LA NANOFOTÓNICA

5.1 La Fotónica

La Fotónica, es la ciencia que da forma (moldea) a un flujo de “luz” con el propósito de transportar una señal modulada, amplificar una señal, generar una señal eléctrica a partir de un grupo de fotones o soportar un función lógica Booleana. La Nanofotónica es la manipulación de la luz a una escala espacial considerablemente más pequeña de longitud de onda, que es típica de 1300-1500nm para aplicaciones en telecomunicaciones. Desde otra perspectiva, la Nanofotónica es el estudio de la interacción de la luz y la materia en una escala nanométrica. La nanofotónica también es definida como la tecnología de fabricación y operación de dispositivos fotónicos (ópticos) a nanoescala [79].

Un gran paso en la teoría cuántica y sus aplicaciones, el láser, una fuente de luz nueva, fue inventado en 1960[78]. El uso de láseres ha cambiado dramáticamente la tecnología y ciencia óptica y es considerado como una de los logros científicos más grandes del siglo 20, a la par con la invención de los transistores. Los láseres tienen una variedad de aplicaciones debido a la alta controlabilidad de su amplitud, fase, frecuencia, y polarización. Sus aplicaciones industriales son conocidas como fotónica u optoelectrónica, como ejemplo se incluyen memorias ópticas, sistemas de comunicaciones por fibra óptica, fabricación óptica y la fotolitografía.

Un disco compacto (CD), comúnmente usado como memoria de solo lectura, es un ejemplo de una memoria óptica. Este tiene numerosas hendiduras en su superficie para almacenar señales digitales. También se han desarrollado memorias de acceso aleatorio, como los discos versátiles digitales (DVD), en el cual un rayo láser enfocado, se usa para almacenar y reescribir información mediante el calentamiento local de la superficie del disco. Un reciente reporte de futuras tendencias en la industria de la fotónica estima que la densidad de almacenamiento de una memoria óptica puede ser de 1Tb/*pulgada*² en el año 2010 (ver figura 5.1), pero el diámetro de de las hendiduras circulares correspondientes para 1Tb/*pulgada*² es de 25 nm, lo cual no puede ser fabricado o leído debido al límite de difracción de la luz [79]. Como una alternativa de la tecnología de almacenamiento, un disco duro que usa tecnología de almacenamiento magnético tiene una densidad de almacenamiento mucho más grande que las memorias ópticas. Sin embargo, este sistema también tiene un límite de densidad de almacenamiento debido a

la inestabilidad termal del dominio magnético. Como resultado a este límite, las densidades mayores a 300Gb/pulgada² son difíciles de obtener.

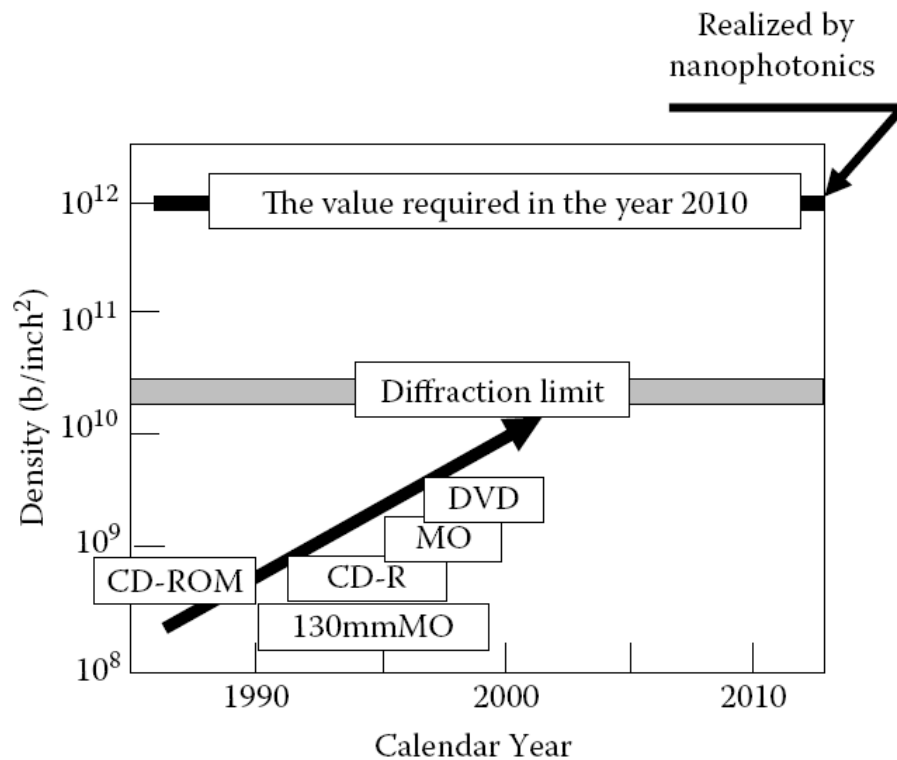


Figura 5.1 Mapa técnico que muestra el incremento en la densidad de almacenamiento de los sistemas de discos ópticos. La densidad de almacenamiento logrado por la nanofotónica.
Fuente: *Principles of Nanophotonics*.

Sistemas de comunicaciones a altas distancias por medio de cables de fibra óptica se han establecido mediante la instalación de cables submarinos de comunicación óptica en los océanos pacífico y atlántico. Estos sistemas también se han venido usando para redes de área local. Estas tendencias técnicas significan que la electrónica en estos sistemas ha sido reemplazada por tecnología óptica. Además, este reemplazo es requerido por sistemas de comunicaciones a muy corta distancia, como sistemas board-board, chip-chip, dispositivo-dispositivo en circuitos electrónicos para incrementar el grado de integración y bajar el consumo de potencia (ver figura 5.2) [80].

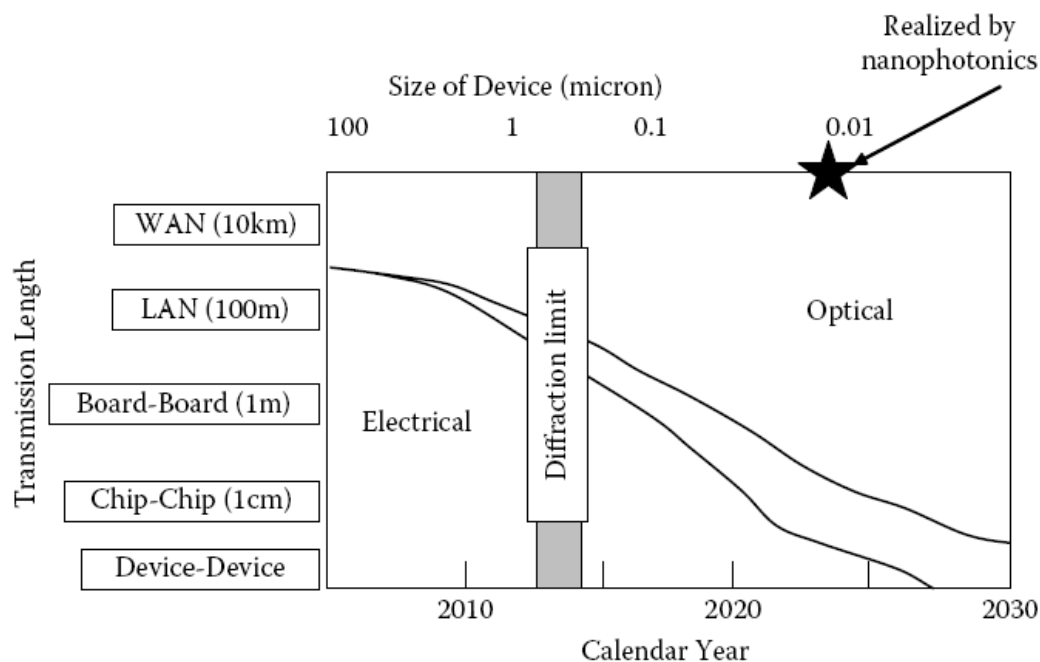


Figura 5.2 Mapa técnico que muestra los requerimientos para reducir el tamaño de los dispositivos fotónicos para sistemas de comunicaciones a corta distancia sobre fibra óptica. El tamaño alcanzado por la nanofotónica también se muestra

Fuente: *Principles of Nanophotonics*.

Por lo tanto, es ventajoso reemplazar algunos dispositivos electrónicos con dispositivos fotónicos para facilitar la conexión con las fibras ópticas. Consecuentemente, el tamaño de los dispositivos fotónicos (ejemplo láseres y moduladores) se deben reducir, para que estén pequeños como los dispositivos electrónicos, para una mayor integración, que, sin embargo es imposible debido al límite de difracción de la luz.

La tecnología de fabricación óptica ha sido desarrollada para la fabricación de una variedad de dispositivos. Por ejemplo, la fotolitografía es popularmente usada para la fabricación de memorias dinámicas de acceso aleatorio (DRAM). Se ha estimado que DRAMs de 64-256 Gb se necesitarán en un futuro cercano y el patrón lineal en estos dispositivos debe ser tan estrecho de 35-70 nm (ver figura 5.3) [81]. Sin embargo, con tal reducción de patrones, estos no pueden ser fabricados debido a la difracción de la luz. Para reducir el patrón por debajo de los límites de la difracción, están en desarrollo varias fuentes de luz que emiten luz ultravioleta extrema, radiación síncrona y rayos X, también como rayos de electrones, pero puede que no sean factibles en producción en masa debido a su gran tamaño, alto consumo de energía y alto costo. Así pues se necesitan herramientas de fabricación prácticas, baratas, que son necesarias para la fabricación de dispositivos semiconductores y dispositivos fotónicos avanzados.

Los ejemplos presentes hoy en día indican que la sociedad del siglo 21 requiere ciencia y tecnología óptica nueva, para hacer frente a la medición, fabricación, control y requerimientos de control en la escala de varias decenas de nanómetros, porque la

ciencia y tecnología óptica tradicional no puede superar el límite de difracción de las ondas de luz.

Después que una onda de luz pase a través de una pequeña abertura en una placa, es convertida en una onda esférica divergente [114]. Tal divergencia es llamada difracción, una característica intrínseca de las ondas. Para una apertura circular, el ángulo de la divergencia es de λ/a , donde λ y a , son la longitud de onda de la luz incidente y el radio de apertura respectivamente. Debido a la difracción, el tamaño del punto de la luz no puede ser cero, aun si es enfocada con lentes convexas. El tamaño del punto en el plano focal es tan largo como λ/NA , donde NA es la apertura numérica, que es más pequeña que la unidad para una lente convexa convencional. Por lo tanto, cuando dos fuentes de punto de luz se localizan más cerca juntas que λ/NA , sus imágenes formadas por los lentes convexas no se pueden interpretar en el plano focal.

Esto también es verdad para la proyección de imágenes debajo de un microscopio óptico y el tamaño más pequeño que se puede resolver con un microscopio óptico es λ/NA , el cual es llamado el límite de difracción. Por lo tanto, para discos ópticos, el almacenamiento y lectura de hendiduras más pequeñas que λ/NA son imposibles. Láseres de longitud de onda más pequeña se han desarrollado para bajar el tamaño del límite de difracción de la hendidura, pero el límite superior de la densidad de almacenamiento alcanzado usando luz visibles es de varios 10 Gb/pulgada², mientras que el valor requerido en el año 2010 es 1Tb/pulgada².

Láseres semiconductores, guías de ondas ópticas y dispositivos ópticos integrados relacionados deben confinar la luz dentro de ellos para un operación efectiva y la capa activa de un láser semiconductor tiene que exceder el volumen del límite de difracción, que es λ^3 , para este confinamiento. El diámetro del núcleo de una fibra óptica debe exceder λ . Estos ejemplos indican que los dispositivos fotónicos no pueden ser más pequeños que la longitud de onda de la luz, que es el tamaño del límite de difracción de los dispositivos fotónicos, pero los dispositivos fotónicos para sistemas de comunicaciones por fibra óptica en el año 2015 deben ser aun más pequeños.

El ancho de línea más pequeño de un patrón fabricado usando fotolitografía esta también limitado por la difracción. El progreso para reducir el tamaño del patrón ha sido el resultado del uso de luz de longitud de onda más pequeña, para bajar el valor del límite de difracción. Sin embargo, el acortamiento adicional de la longitud de onda requiere fuentes de luz gigantes, caras, que se pueden volver prohibitivas cuando se desarrolla sistemas prácticos de microfabricación. Para fuentes de luz visible, el ancho de línea de 35-70 nm requerido para DRAM de 64-256Gb, esta más allá del límite de difracción. Para ir más allá del límite de difracción se tiene que abrir un nuevo campo de la ciencia y tecnología óptica, este campo se llama la nanofotónica.

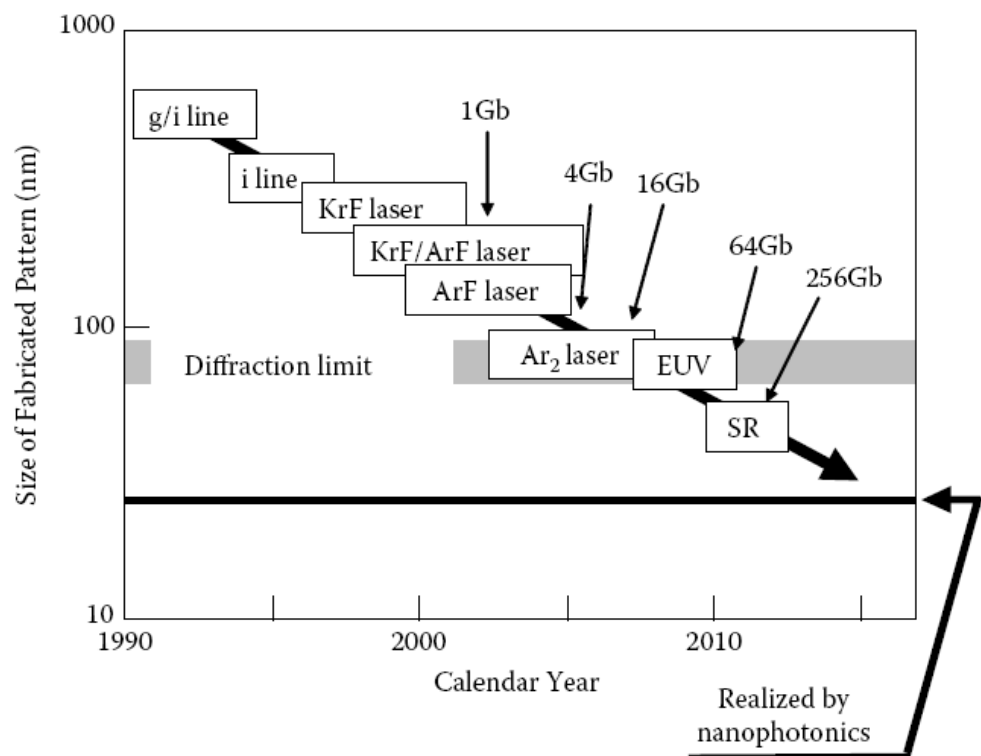


Figura 5.3 Mapa técnico de la reducción del ancho de línea en modelos fabricados mediante la fotolitografía. También se muestran los nombres de las fuentes de luz y la capacidad de las DRAM. Las siglas EUV y SR significan luz ultravioleta y radiación síncrona respectivamente. El ancho de línea alcanzado por la nanofotónica.

Fuente: *Principles of Nanophotonics*.

5.2 Naturaleza de la Nanofotónica

El campo óptico cercano, es un campo electromagnético que media la interacción entre las partículas nanométricas localizadas a gran proximidad una de la otra. La nanofotónica utiliza este campo para realizar dispositivos nuevos, fabricaciones y sistemas [82]. Es decir, un dispositivo fotónico con una función nueva puede ser operado transfiriendo la energía óptica del campo cercano entre las partículas nanométricas y la disipación subsecuente. En dicho dispositivo, el campo óptico cercano transfiere una señal y transporta información. En los sistemas de fotónica nuevos son posibles mediante el uso de estos dispositivos fotónicos nuevos. Además, si la magnitud de la energía de campo óptico cercano transferida es lo suficientemente grande, estructuras o conformaciones de partículas nanométricas pueden ser modificadas, lo cual sugiere la viabilidad de la fabricación de la fotónica nueva.

La verdadera naturaleza de la nanofotónica es realizar “innovación cualitativa” en dispositivos fotónicos, fabricación y sistemas utilizando funciones nuevas y fenómenos

causados por las interacciones del campo óptico cercano, lo cual es imposible mientras se siga utilizando la propagación tradicional de la luz (ver figura 5.4).

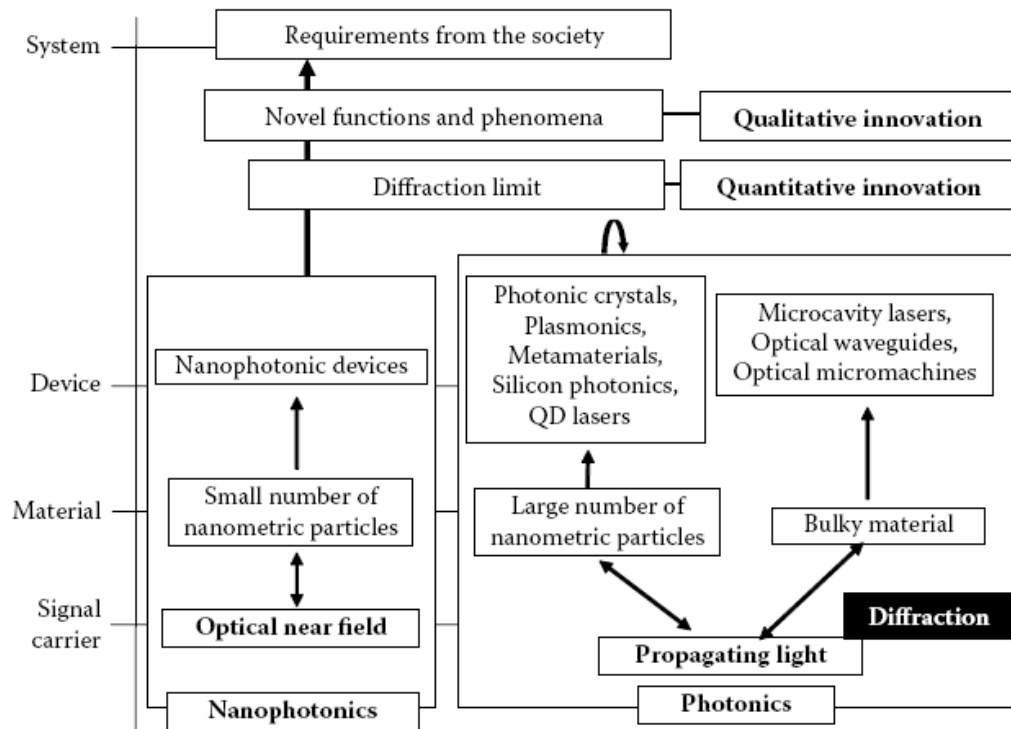


Figura 5.4 Nanofotónica para realizar innovación cualitativa
Fuente: *Principles of Nanophotonics*.

Se puede entender que la ventaja de ir más allá del límite de difracción, es decir, “innovación cualitativa,” no sigue siendo esencial, pero solamente una naturaleza secundaria de la nanofotónica. En este sentido, uno debe también observar la microscopía de campo óptico cercano, es decir, la metodología usada para la adquisición e interpretación de imágenes de una manera no destructiva, no es una aplicación apropiada de la nanofotónica porque la magnitud de la energía de campo óptico cercano transferido entre la punta de prueba y la muestra debe ser extrapolada a cero para evitar la destrucción de la muestra.

La innovación cualitativa se ha venido realizando mediante el rompimiento del límite de difracción. Se incluyen algunos ejemplos siguientes:

1. Sistemas híbridos de almacenamiento en disco óptico-magnéticos: el campo óptico cercano es usado para calentar localmente la superficie del medio de almacenamiento magnético para bajar la compresión. Inmediatamente después del calentamiento, el campo magnético escribe las hendiduras. El Proyecto Nacional Japonés (METI-NEDO programa titulado “Tecnología Terabyte de almacenamiento óptico”) ha logrado 1Tb/pulgada² de densidad de

almacenamiento, lo cual es más alto que el límite de difracción de almacenamiento óptico y el límite impuesto por las fluctuaciones térmicas de una sistema de disco duro (ver figura 5.5) [83].

2. Sistemas y dispositivos nanofotónicos: La operación de dispositivos fotónicos nuevos, se han demostrado mediante la utilización de la transferencia de energía óptica de campo cercano entre puntos cuánticos (QD) localizados cerca y la disipación subsecuente. Estos dispositivos son mucho más pequeños que la longitud de onda de la luz (ver Figura 5.6). Un sistema de enrutamiento nuevo también fue demostrado usando gran cantidad de dispositivos nanofotónicos para mostrar que el tamaño del sistema es mucho más pequeño que la de un sistema convencional (figura 5.7) [84].
3. Deposición de vapor fotoquímico y la fotolitografía: un campo óptico cercano es usado para excitar las moléculas para la fabricación con resolución nanométrica (figura 5.8) [85].

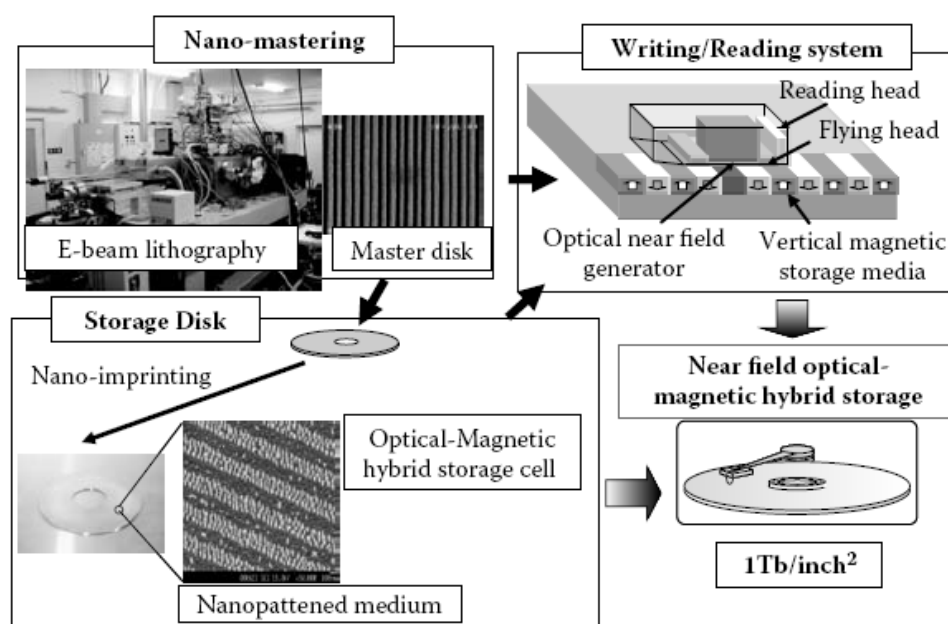


Figura 5.5. Sistemas híbridos de almacenamiento de alta densidad óptico-magnéticos.
Fuente: *Principles of Nanophotonics*.

Para microscopios y espectroscopios que usan campos ópticos cercanos, se ha desarrollado un espectroscopio de campo cercano para el diagnóstico de QD semiconductor individual [86], dispositivos semiconductores [87], moléculas orgánicas individuales [88] y especímenes biológicos [89]. Numerosos resultados experimentales se

han acumulado, de fotoluminiscencia espacialmente resuelta y espectros Raman con una resolución de 10 nm [90].

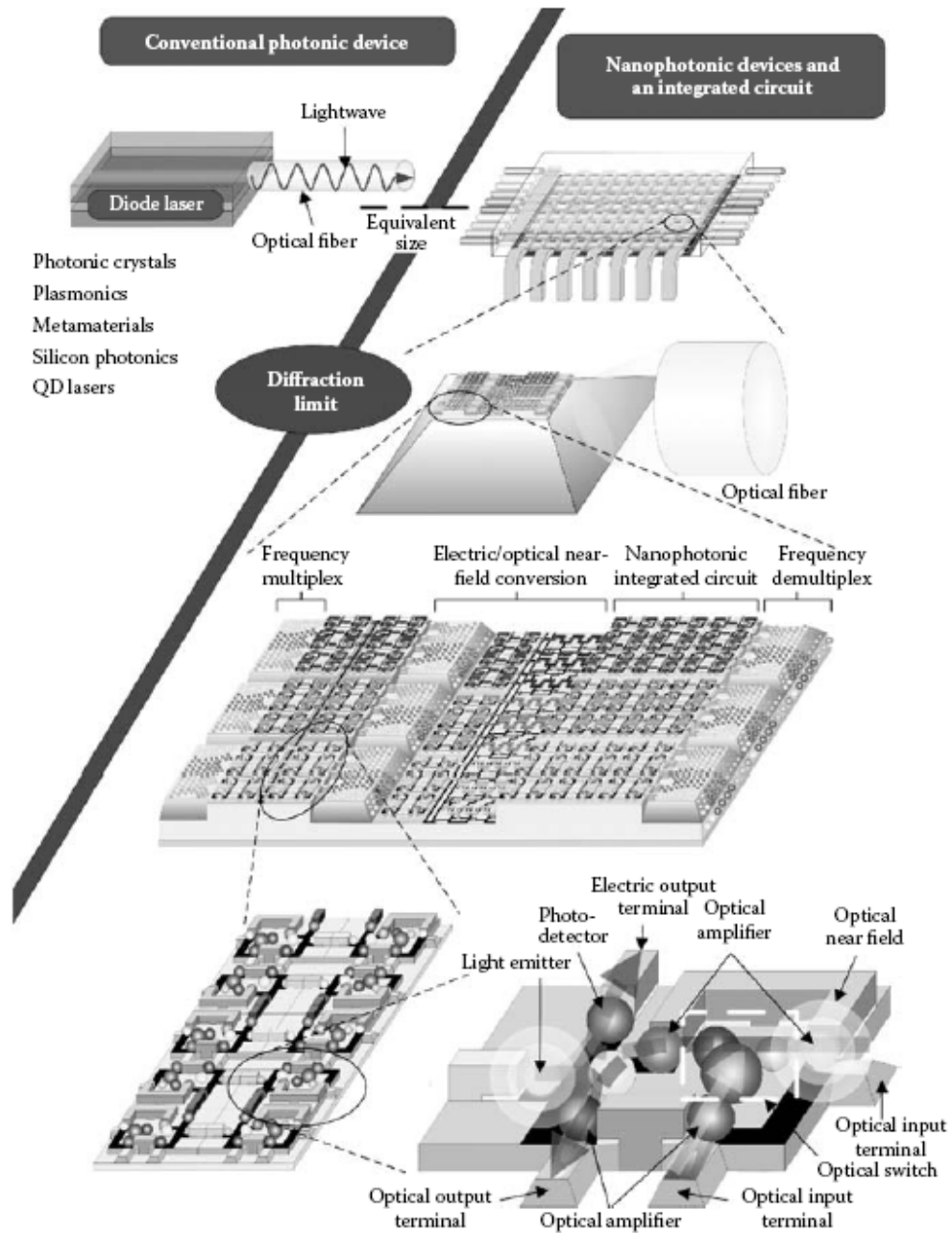


Figura 5.6. Dispositivos nanofotónicos y un circuito integrado
Fuente: *Principles of Nanophotonics*.

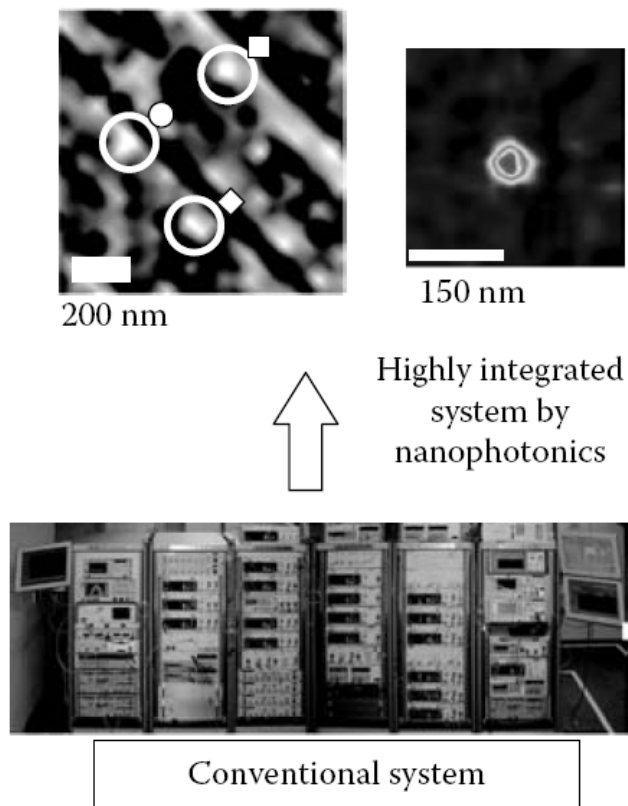


Figura 5.7. Sistema convencional de enrutamiento y su mejoramiento usando Nanofotónica.
Fuente: *Principles of Nanophotonics*.



Figura 5.8. Litografía Nanofotónica. Derecha: Apariencia del sistema. Izquierda: Un escaneo con un microscopio de electrones de un patrón corrugado fabricado.
Fuente: *Principles of Nanophotonics*.

Espectrómetros de fotoluminiscencia comerciales de campo cercano se han producido para la operación a en el espectro ultravioleta-infrarrojo y cuartos con rangos de temperatura de helio líquido [91]. Estos son usados popularmente en diferentes áreas de la tecnología y nanociencia.

Sin embargo, es importante observar que estos ejemplos también realizan la innovación cualitativa. Algunos ejemplos incluyen los siguientes:

1. Un sistema de almacenamiento óptico que contiene un disco óptico y un disco híbrido óptico-magnético: mediante la utilización de la naturaleza jerárquica inherente de los campos ópticos cercanos, un sistema de memoria multicapa se ha demostrado [92]. Además, mediante la utilización de la transferencia de energía de campo óptico cercano y disipación subsecuente, se ha desarrollado un sistema de memoria detectable [93].
2. Sistemas y dispositivos nanofotónicos: Para operar los dispositivos nanofotónicos arriba mencionados, la transferencia de energía de campo óptico cercano se utiliza entre los niveles prohibidos de energía de la transición óptica de QD adyacentes, lo cual es imposible mientras se use propagación de luz. Disipación subsecuente de energía en un QD puede arreglar la posición y la magnitud de la energía transferida de campo óptico cercano. Ensamblando estos dispositivos, el sistema óptico enrutado ha establecido una innovación cualitativa en su desempeño nuevo [94].
3. Deposición de vapor fotoquímico y fotolitografía: un proceso no adiabático que no sigue el principio de Franck-Condon se ha demostrado [95], el cual se atribuye a el intercambio de un *excitón-fonón-polariton* virtual un campo óptico cercano. Este proceso ha permitido la deposición y la litografía usando una fuente luminosa de longitud de onda larga, lo que sugiere que fuentes de luz ultravioleta grande y costosa no sean requeridas. Esto también sugiere que moléculas inofensivas químicamente estables pueden ser disueltas.

La Nanofotónica también ha llevado al crecimiento de otras ciencias relacionadas. Un ejemplo es la fotónica atómica, la cual controla los movimientos termales de átomos neutros en vacío, usando campos ópticos cercanos [96]. Estudios teóricos han examinado la manipulación de un solo átomos basados el modelo virtual excitón-polariton [97], y en un estudio experimental, un átomo fue guiado satisfactoriamente a través de una fibra óptica hueca [98]. Estudios recientes han examinado dispositivos de detección de átomos [99], deflectores de átomos [99], y un embudo atómico [99]. La fotónica atómica abrirá un nuevo campo de la ciencia que examina la interacción entre excitones-polaritones y un átomo. Más adelante, pueden ser aplicados a tecnologías nuevas, para fabricar materiales a nivel atómico.

La opinión general con relación a la tecnología moderna es que “la luz debe ser utilizada para comunicaciones porque es rápida” mientras “el electrón debe ser utilizado para computadores porque es pequeño.” Esto significa que la luz no puede ser usada en computadores porque es grande. Sin embargo, la miniaturización de los dispositivos electrónicos está llegando al límite fundamental, debido a la corriente eléctrica que se

escapa a través de las películas ultrafinas. No obstante, la nanofotónica ya ha demostrado la posibilidad de la miniaturización de dispositivos fotónicos más allá del límite de difracción (innovación cualitativa), así como las funciones y fenómenos nuevos. Esto significa que la nanofotónica tiene un potencial para abrir nuevos campos de la tecnología, que son imposibles con la fotónica convencional y que se desvía de la opinión general.

6.0 APLICACIONES EN LAS TELECOMUNICACIONES

El enfoque de las telecomunicaciones actuales es transmitir pulsos de luz a alta velocidad y de una manera eficiente. Las fibras ópticas y la mayoría de fibras ópticas micro estructuradas han confiado en la transparencia del sílice, para proveer bajas pérdidas de transmisión. La nanofotónica y la nanoelectrónica pretenden solucionar muchos de los problemas y mejorar las comunicaciones en la actualidad, muchos avances se han venido desarrollando en estos campos, de los cuales se van a mencionar algunos en esta sección.

6.1 Láseres de Cascada Cuántica

Los láseres de cascada cuántica (QC), son dispositivos que explotan la tecnología de cristal fotónico. Los láseres QC son una clase de láseres semiconductores de alto desempeño inventados a mediados de los años 90. Se construyen mediante el apilamiento de una capa sobre otra capa ultradelgadas atómicas de materiales semiconductores estándar (por ejemplo los usados en fotónica). Mediante la variación del grueso de las capas, es posible seleccionar una longitud de onda particular de luz, que el láser QC va a emitir, permitiendo a los ingenieros diseñar láseres con características específicas. Estos láseres son compactos, robustos y poderosos [2], ver figura 6.

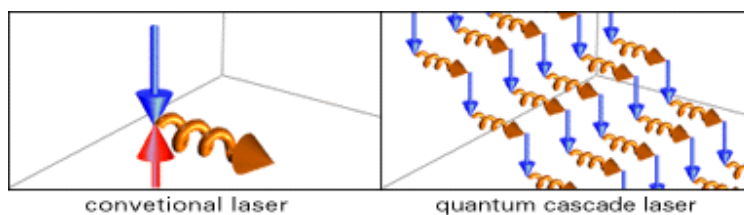


Figura 6. Comparativa entre un láser convencional y un láser QC.
Fuente: Bell Laboratories.

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un láser QC, los electrones forman una “escalera” de energía y cada vez que un electrón golpea un escalón, un fotón de luz infrarroja es emitido. Los fotones emitidos son reflejados hacia atrás y hacia adelante dentro del semiconductor resonador, que contiene la cascada electrónica, estimulando la emisión de otros fotones. Este proceso de amplificación permite la generación de alta potencia de salida desde un pequeño dispositivo. Los láseres QC han probado ser una

fuentes de luz convenientes y están disponibles comercialmente. Las aplicaciones también incluyen óptica de espacio libre de transmisión a 10 μm .

Los láseres QC estándar, emiten luz desde los bordes (ellos no pueden emitir luz láser a través de la superficie del dispositivo). Se ha creado un láser QC de emisión de superficie usando las cualidades precisas para controlar la luz de un cristal fotónico; para crear un láser QC (usando litografía de rayos de electrones) que emite fotones perpendiculares a las capas semiconductoras, resulta en un láser que emite luz por la superficie. El láser tiene “solamente” 50000 nm de largo; esto es algo más grande que la nanoescala, pero es compacto por consideraciones estándar. Los láseres compactos hacen posible gran cantidad de arreglos de dispositivos, que sean producidos en un solo chip, cada uno diseñado con sus propiedades únicas de emisión. Tales dispositivos, láseres en los chips, pueden llevar a nuevas posibilidades, para comunicaciones ópticas, así como otras tecnologías optoelectrónicas y de sensado [2].

6.2 Fibras de Cristal Fotónico

La fibra óptica estándar basada en sílice es un filamento de vidrio que tiene un revestimiento de 125 μm de diámetro y un núcleo interno de 10 μm . El núcleo interno tiene un índice de refracción más alto de que el revestimiento que lo rodea. Esto permite al núcleo atrapar y guiar la luz mediante la reflexión interna total; la luz se propaga por la guía con relativa poca pérdida (en el rango de 0.5 dB/Km.). La principal fuente de pérdida óptica es la dispersión intrínseca de la luz del sílice, debido a la estructura molecular del mismo vidrio. La adición de amplificadores ópticos (Ver figura 6.1) a lo largo del trayecto de la señal ha dado soporte a circuitos de larga transmisión sin requerir de terminaciones eléctricas y remodulación, pero esto también ha introducido una nueva limitación, llamada la dispersión (ensanchamiento del pulso).

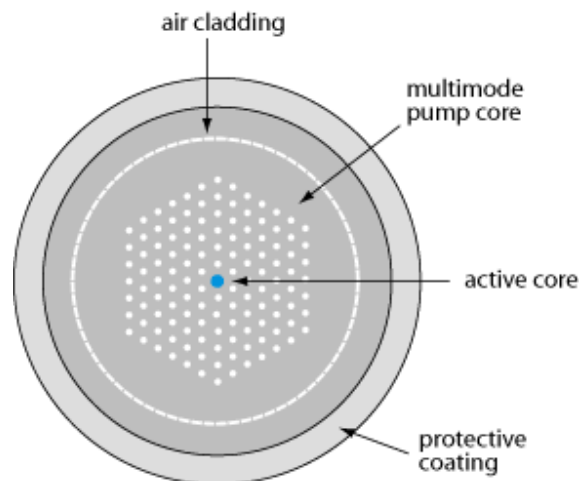


Figura 6.1. Estructura de una fibra de cristal fotónico con revestimiento de aire.
Fuente: Rp Photonics.

Para sostener la capacidad de ancho de banda en un filamento de una sola fibra, se debe tener en cuenta la pérdida, dispersión, y otros apremios en la fibra. E investigación intentos de hacer esto en el pasado (por ejemplo usar materiales nuevos como fibras de fluoruro), pero estas iniciativas no han progresado a buen término. Los cristales fotónicos ofrecen la posibilidad de nuevos dispositivos ópticos, como filtros, atenuadores, controladores de polarización, convertidores de longitud de onda, entre otros dispositivos fotónicos, que pueden manipular la luz, en vez de solo transportarla o filtrarla. Las investigaciones han mostrado que, fibras microestructuradas, es confinada la luz por huecos de aire en la fibra, en vez de ser confinada por el pequeño índice diferencial (contraste) de las fibras convencionales. Esto provee un gran contraste. Esta inclusión de huecos de aire longitudinales alrededor del núcleo óptico produce nuevas capacidades con respecto a las características ópticas (ejemplo no linealidad resultado del extremo confinamiento de la luz y la baja dispersión). El alto contraste del índice refractivo entre el vidrio y lo huecos de aire permite a la luz (bajo las circunstancias adecuadas) ser guiada en el aire, en vez de ser tomada en el vidrio de alto índice. Estas fibras pueden soportar una gran capacidad de transporte de información debido a la habilidad de multiplexar a través de un ancho de banda amplio.

La idea de usar huecos de aire espaciados periódicamente para guiar la luz longitudinalmente fue introducida a mediados de los años 90, y sin embargo la operación real de brecha de banda no fue alcanzada en ese tiempo. La primera fibra con núcleo de aire fue demostrada en 1998, con propagación a través de estructuras de 1m de longitud. Los huecos en la fibra también pueden ser llenados con otros materiales, como polímeros, líquidos o cristales líquidos [2].

Si esta clase de fibras pueden ser manufacturadas en cierta manera para lograr bajas pérdidas, ellas se convertirán prácticas para las aplicaciones en telecomunicaciones.

6.3 Nanoredes

Las nanoredes hacen referencia a cierta cantidad de dispositivos a nanoescala conectados entre sí (en un solo chip), en los que la codificación de la información se realiza de una manera diferente a la tradicional. El potencial de las nanoredes es ilimitado y tienen aplicación en muchos campos como [103]:

- Telecomunicaciones
- Biomédica
- Medio ambiente
- Aplicaciones militares e industriales.

Es de nuestro mayor interés el conocer como se comunican estos dispositivos para realizar una comparación con las comunicaciones tradicionales.

6.3.1 La Comunicación entre Nanomáquinas

La comunicación en entre nanomáquinas les permite trabajar en sincronía, de una forma supervisada y cooperada, para así lograr un objetivo común. Existen dos formas o escenarios que se pueden presentar en la comunicación de nanomáquinas: (a) una comunicación entre nanomáquinas y (b) una comunicación entre sistemas más grande como dispositivos microelectrónicos, entre dos o más nanomáquinas.

Diferentes tecnologías de comunicación, como electromagnética, acústica, molecular se han propuesto para cada escenario [104]. La comunicación basada en ondas electromagnéticas es la técnica más común para interconectar dispositivos microelectrónicos. Estas ondas se pueden propagar con pérdidas mínimas a lo largo de cables o a través del aire. Sin embargo, dado el tamaño de las nanomáquinas, cablear una gran cantidad de ellos es una tarea irrealizable. Como una alternativa, soluciones inalámbricas pueden ser utilizadas. Para establecer una comunicación inalámbrica bidireccional, un transreceptor de radiofrecuencia debe ser integrado en las nanomáquinas. Antenas a nanoescala pueden ser desarrolladas para comunicaciones de alta frecuencia. Sin embargo, debido al tamaño y la complejidad actual de los transreceptores, estas no pueden ser fácilmente integradas a las nanomáquinas. Si la integración fuera posible, la potencia de salida del nanotransreceptor no sería suficiente para establecer un canal de comunicación bidireccional [104]. Como consecuencia, la comunicación electromagnética puede ser utilizada para transmitir información desde un microdispositivo a una nanomáquina, pero no desde una nanomáquina a un microdispositivo, ni entre las nano-máquinas.

A nanoescala, la comunicación acústica esta principalmente basada en transmitir ondas ultrasónicas. Similar a la comunicación basada en ondas electromagnéticas, la comunicación acústica implica la integración en las nanomáquinas de transductores ultrasónicos. Estos transductores deben ser capaces de censar las variaciones rápidas de la presión producida por las ondas ultrasónicas y por consecuencia emitir señales acústicas. El tamaño de estos transductores representa un gran reto para la integración en las nanomáquinas. En la comunicación nanomecánica, la información es transmitida a través de juntas duras entre los dispositivos enlazados. La principal desventaja de este tipo de comunicación es que se requiere un contacto físico entre el transmisor y el receptor. Por otra parte, este acople debe ser lo suficientemente preciso para garantizar que los transreceptores mecánicos estén alineados correctamente. Esta técnica de la comunicación no es conveniente en muchos panoramas donde las nanomáquinas se despliegan a lo largo de grandes áreas sin ningún contacto entre ellas. Además sin sistemas de navegación precisos en las nanomáquinas, su posicionamiento para una correcta comunicación nanomecánica es un gran reto [103].

La comunicación molecular se define como la transmisión y recepción de información codificada en moléculas. La comunicación molecular es un nuevo campo interdisciplinario que expande las Nanotecnologías, las biotecnologías y las comunicaciones [105]. A diferencia de las técnicas de comunicación anteriores, el proceso de integración de transreceptores moleculares en nanomáquinas es más factible debido al tamaño y al dominio natural de los transreceptores moleculares. Estos transreceptores son

nanomáquinas, las cuales son capaces de reaccionar a moléculas específicas y emitir otras respuestas a un comando interno.

La comunicación molecular puede ser usada para interconectar nanomáquinas, dando como resultado las nanoredes. Las nanoredes mejoran las capacidades de una sola nanomáquina de la siguiente manera:

- Se pueden alcanzar objetivos más complejos si cooperan múltiples nanomáquinas. Las nanoredes pueden cooperar mediante mecanismos de intercambio de información entre diferentes nanomáquinas como motores moleculares o nanointerruptores [103].
- Las nanomáquinas individuales solo pueden realizar tareas a nanoescala y por consiguiente su espacio de trabajo es muy limitado. Sin embargo, si un gran número de nanomáquinas se interconectan, ellas pueden llegar a cumplir objetivos a macroescala y trabajar sobre grandes áreas, así como el tratamiento de tumores cancerosos o el monitoreo de la polución del aire [103].
- Si múltiples nanomáquinas son puestas sobre una gran área, la interacción con una nanomáquina específica es extremadamente difícil debido a su pequeño tamaño. La interacción incluye procedimientos como la activación y desactivación de las nanomáquinas, configuración de los parámetros, adquisición de datos o comandos de actuación. Las nanoredes permitirán esta interacción proporcionando la infraestructura y mecanismos para difundir la información sobre grandes áreas. Dos nanomáquinas podrían interactuar indirectamente mediante la utilización de otras nanomáquinas como repetidores [103].

Comparadas con las actuales tecnologías de redes de comunicación, las nanoredes poseen las siguientes ventajas:

- El tamaño reducido de las nanomáquinas y de los componentes de las nanoredes pueden ser una ventaja en muchas aplicaciones, donde la dimensión del sistema es crítica. Por ejemplo, en el campo biomédico, las nanomáquinas pueden ser utilizadas para aplicaciones *intra-body* (en el cuerpo), permitiendo a las nanoredes realizar tratamientos más selectivos y nanoinvasivos [103].
- Las reacciones químicas son altamente eficientes en términos de consumo de energía [106]. Estas reacciones podrán proveer de energía a las nanoredes y sus procesos. Las reacciones químicas también pueden representar procesos complejos de cómputo, donde en las comunicaciones tradicionales podrían significar operaciones múltiples [103].

6.3.2 Nanoredes Vs. Redes Tradicionales de Comunicación

Las nanoredes no son una simple extensión a nanoescala de las redes tradicionales de comunicación. Ellas son un nuevo paradigma en la comunicación, en donde la mayoría de

procesos de comunicación están inspirados en sistemas biológicos encontrados en la naturaleza. Las nanoredes tienen las siguientes diferencias con las redes tradicionales de comunicación:

- En las nanoredes, el mensaje se codifica usando moléculas; mientras en las redes de comunicación tradicionales, la información es codificada en señales electromagnéticas, acústicas u ópticas. Se pueden considerar dos diferentes y complementarias técnicas de codificación para representar la información en las nanoredes. La primera utiliza secuencias temporales para codificar la información, como la concentración temporal de moléculas específicas en el medio. De acuerdo con el nivel de concentración, por ejemplo, el número de moléculas por volumen, el receptor decodifica el mensaje recibido. Por ejemplo, esta técnica es utilizada por el sistema nervioso central para propagar los impulsos neurales. Esta técnica puede considerarse similar a las usadas en las redes tradicionales donde secuencias variantes en el tiempo transportan la información. La segunda técnica, llamada codificación molecular, usa parámetros internos de las moléculas para codificar la información como la estructura química, posicionamiento relativo de los elementos moleculares o polarización [105]. En este caso, el receptor debe ser capaz de detectar estas moléculas específicas para decodificar la información. Esta técnica es similar a la usada en los paquetes encriptados en las redes de comunicación, en donde solo el receptor previsto es capaz de leer la información. En la naturaleza, la codificación molecular es usada en la comunicación por medio de feromonas, donde solo los miembros de la especie transmisora pueden decodificar la información [103].
- La velocidad de propagación de las señales utilizadas en las redes de comunicación tradicionales, como las ondas electromagnéticas o acústicas, es mucho más rápida que la propagación de mensajes moleculares. En las nanoredes, la información, ejemplo, moléculas, tiene que ser transportadas físicamente desde el transmisor hasta el receptor. Las moléculas pueden estar sujetas a procesos aleatorios de difusión y condiciones ambientales, como la temperatura, que pueden afectar la propagación de mensajes moleculares [103].
- En las redes tradicionales de comunicación, el ruido se describe como una señal indeseada superpuesta con las señales que transportan información. En las nanoredes, de acuerdo con las técnicas de codificación, dos tipos diferentes de ruido pueden afectar los mensajes. Primero, como ocurre en los sistemas de comunicación tradicionales, el ruido puede superponerse con las señales moleculares como el nivel de concentración de moléculas. Esto significa que otra fuente emite las mismas moléculas usadas para codificar el mensaje, entonces pueden afectar la concentración censada por el receptor. En las nanoredes, el ruido puede también entenderse como una reacción indeseada que ocurre entre las moléculas de información y otras moléculas presentes en el ambiente. Estas reacciones pueden modificar la estructura de las moléculas de información y por consiguiente el receptor no podrá detectar el mensaje transmitido [103].
- El texto, la voz y el video se transmiten usualmente sobre redes de comunicación tradicionales. En contraste, en las nanoredes, como el mensaje es una molécula,

la información transmitida está más relacionada con fenómenos, estados químicos y procesos [107].

- En las nanoredes, la mayoría de procesos son conducidos químicamente resultando en un bajo consumo de energía. En las redes de comunicación tradicionales los procesos de comunicación consumen energía eléctrica que es obtenida de baterías o de fuentes externas como inducción electromagnética [103].

En la siguiente tabla 6.1 [108] se muestra un resumen de las diferencias entre una red de comunicación tradicional y una nanored.

Comunicación	Tradicional	Molecular
Portadora	Ondas Electromagnéticas	Moléculas
Tipo de señal	Electrónica y óptica	Química
Velocidad de propagación	Velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ m/s)	Extremadamente baja
Condiciones del medio	Alambrado: Casi inmune	Comunicación afectada
	Inalámbrico: Comunicación afectada	
Ruido	Campos electromagnéticos y señales	Partículas y moléculas en el medio
Información codificada	Voz, texto y video	Fenómenos, estados químicos o procesos
Otras características	Alto consumo de energía	Bajo consumo de energía

Tabla 6.1 Diferencias principales entre las redes de comunicación tradicionales y las nano redes que utilizan comunicación molecular.

6.3.3 Componentes de una Nanored

Los primeros modelos de nanoredes están basados en las tecnologías de la información y comunicación (ICT). En la figura 6.2 se muestran los conceptos generales de las nanoredes vs. los sistemas de comunicación existentes. Los componentes de las nanoredes son similares en funcionamiento a los encontrados en las redes tradicionales. En las nanoredes, se pueden identificar cinco componentes diferentes: el nodo transmisor, el nodo receptor, el mensaje, la portadora y el medio. Cada uno de estos componentes afecta el proceso de comunicación, que incluye los siguientes pasos como se observan :

- El transmisor codifica el mensaje en las moléculas.
- El transmisor inserta el mensaje en el medio soltando las moléculas al ambiente o adjuntándolo a portadores moleculares.
- El mensaje se propaga desde el transmisor hasta el receptor.
- El receptor detecta el mensaje.
- El receptor decodifica el mensaje molecular en información útil como una reacción, almacenamiento de datos, comandos de actuación, etc.

- *Transmisores y receptores*

El rol del transmisor lo realiza una nanomáquina como una célula viva modificada, un implante biomédico o un nanorobot. En las redes de comunicación tradicionales, los nodos codifican la información mediante la modulación de señales electromagnéticas. En las nanoredes los nodos codifican la información mediante la modificación de moléculas mediante reacciones químicas. Las nanomáquinas también realizan el papel de receptores. El receptor debe ser capaz de extraer el mensaje del medio. Como las nanomáquinas son muy simples y el mensaje es básicamente una molécula, la manipulación de este mensaje no puede ser una tarea trivial. El mensaje contiene información útil que va a ser utilizada por el receptor. A nivel molecular, esto significa responder el mensaje, guardarlo o reaccionar a él. Los nodos de la nanored transmiten y reciben moléculas. Estas moléculas son una fuente infinita. Esto tiene dos consecuencias: La primera, la nanomáquina transmisora debe ser capaz de obtener, de una fuente externa, moléculas sin procesar y almacenarlas para su posterior uso en mensajes.

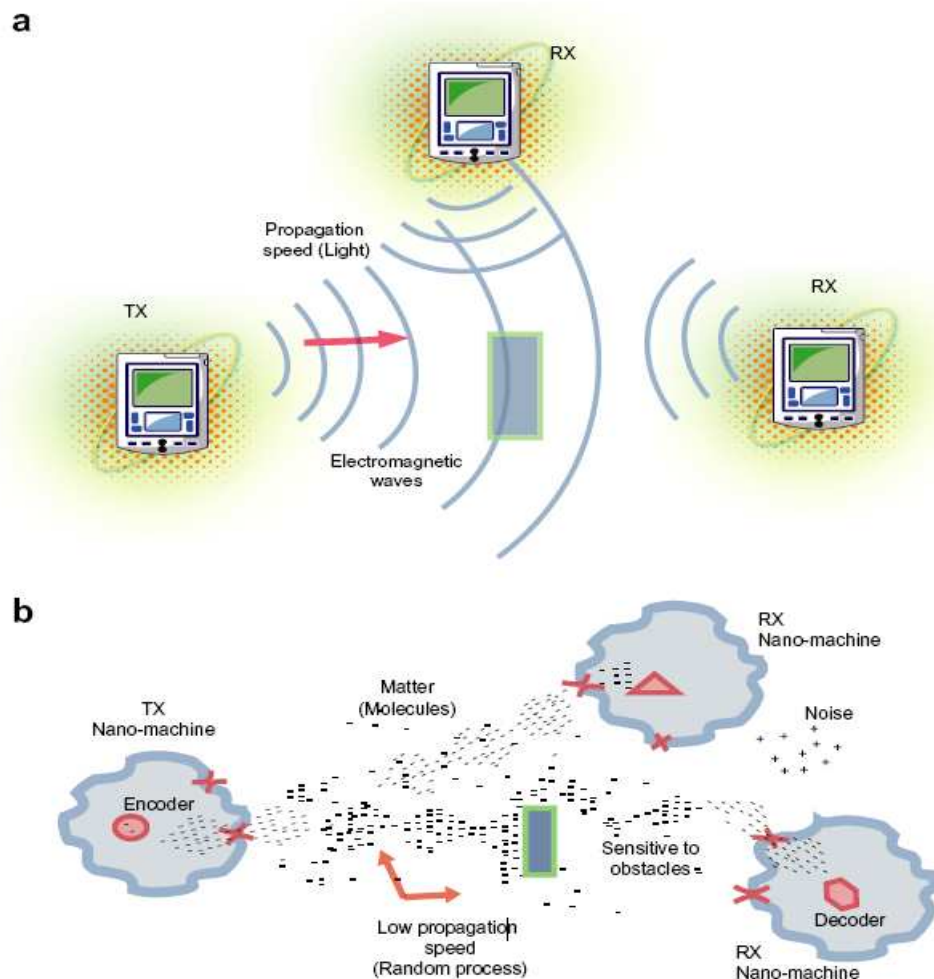


Figura 6.2 Comparación entre los sistemas tradicionales de comunicación y las nanoredes
Fuente: Ian F. Akyildiz a, Fernando Brunetti, Cristina Blázquez. Nanonetworks: A new communication paradigm.

La segunda, la nanomáquina receptora debe estar en la capacidad de poner en cola un número limitado de moléculas y también incluir mecanismos de liberación de este “búfer molecular” para estar listo para los siguientes mensajes [103].

- *Mensaje*

En las redes tradicionales de computadores, la información se representa usando el sistema binario y el mensaje transmitido usualmente es una cadena de bits. En la comunicación molecular, el mensaje es una molécula. Este mensaje molecular tendrá tres características importantes [104]. La primera, este presentará una estructura externa predefinida que permitirá un fácil reconocimiento en el receptor. La segunda, esta estará inactiva. Esto significa que los mensajes moleculares no serán propensos a reaccionar a otras moléculas en el medio. Por último, los mensajes moleculares deberían ser fácilmente eliminables sin ningún efecto secundario una vez que ellos son decodificados en la nanomáquina receptora. Un candidato potencial para la mensajería molecular es el polietileno parcialmente fluorado [109]. Esta molécula puede ser compuesta mediante una secuencia de átomos de hidrogeno y flúor, dando como resultado una secuencia binaria capaz de almacenar datos digitales [110].

- *Portadora*

En las comunicaciones clásicas, una portadora se utiliza para transportar el mensaje. La portadora se usa debido a sus ventajas en las características de la señal, especialmente en términos de propagación. En las redes de computadores tradicionales, las portadoras también permiten la creación de múltiples canales de comunicación. En las nanoredes, las portadoras son moléculas particulares que son capaces de transportar señales químicas o estructuras moleculares que contienen información. El objetivo de las portadoras moleculares es la de mejorar las características de la propagación de una molécula de información individual, para crear una comunicación más confiable mediante la protección de las moléculas de fuentes externas de ruido y finalmente permitir la creación de canales independientes múltiples usando el mismo medio. El uso de moléculas como portadoras de información en la comunicación molecular fue observado en sistemas biológicos. De acuerdo con estas observaciones, dos tipos potenciales de portadoras ha sido identificadas: los motores moleculares y los iones de calcio [111]. Los motores moleculares, ejemplo kinesin, dynein y myosion, son proteínas que generan movimiento utilizando energía química. Estos motores proteínicos pueden transportar un paquete de datos, ejemplo una molécula [112]. El segundo tipo de portadora consiste en iones de calcio. El transmisor puede modular la concentración de estos iones en amplitud y en frecuencia para codificar información [113].

- *Medio*

Las redes inalámbricas de comunicación se han desarrollado para casi cualquier tipo de medio encontrándose en la naturaleza en la parte aérea, submarina y subterráneo. Muchas de las tecnologías de transmisión inalámbricas se han aplicado con éxito para comunicar dispositivos implantables. La propagación de señales de una red típica, como acústicas, ópticas o electromagnéticas, pueden ser afectadas por las condiciones del medio. En la comunicación molecular, el medio puede estar seco o húmedo, ejemplo en redes dentro del cuerpo o de monitoreo ambiental y la propagación es aun más dependiente de las condiciones del medio. La velocidad del medio, que es más rápida que la velocidad de propagación de las moléculas, puede afectar la comunicación entre nanomáquinas. Los obstáculos físicos en el trayecto de la señal pueden impedir la propagación de las moléculas, que pueden atravesar objetos sólidos [103].

6.3.4 Comunicación usando motores moleculares

La comunicación molecular mediante el uso de motores moleculares se realiza en un medio acuoso. El ambiente debe incluir los componentes necesarios en condiciones biológicas apropiadas [103], como la temperatura, humedad, viscosidad del medio y pH. Debido a la naturaleza orgánica y química de las nanomáquinas y los paquetes de información, la nanored es altamente sensible a estas condiciones y la comunicación puede afectarse negativamente por cambios súbitos en las condiciones del ambiente. En la figura 6.3 se observan los componentes de un sistema de comunicaciones basado en motores moleculares.

En la comunicación molecular basada en motores moleculares, la comunicación incluye un transmisor y solo un receptor. Cuando la comunicación ocurre, la molécula de información es alterada y la información codificada se pierde. Por consiguiente, la molécula de información restringe la comunicación a un receptor. El resultado es similar al de un enlace físico punto a punto en las redes de comunicación tradicionales [103].

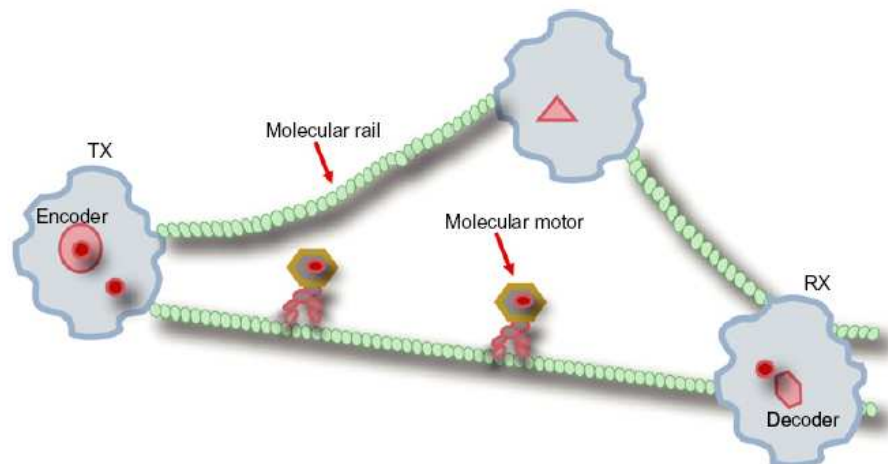


Figura 6.3 Componentes de un sistema de comunicaciones basado en motores moleculares
Fuente: Ian F. Akyildiz a, Fernando Brunetti, Cristina Blázquez. Nanonetworks: A new communication paradigm

En el lado del transmisor, las moléculas de información son cargadas en motores moleculares, lo cuales transportan la información a lo largo de microtubos hasta el receptor. Los paquetes pueden ser encapsulados en vesículas. Una vesícula es una fluido o una cavidad llena de aire que puede almacenar o digerir productos celulares [103]. Esta encapsulación tiene dos objetivos. Primero, esto permite el mejoramiento de la compatibilidad entre la molécula de información y el motor molecular, permitiendo el uso de diversos tipos de moléculas como paquetes de información. Segundo, la encapsulación protege las moléculas de información de la posible reacción con receptores antagonistas presentes en el medio [103].

Dependiendo de la infraestructura de la nanored, una nanomáquina transmisora podrá utilizar mecanismos difusión individual o multidifusión. Para implementar el primer mecanismo, el transmisor debe estar en la capacidad de seleccionar una vía molecular específica para transmitir la molécula de información al receptor deseado. Para lograr la multidifusión, el transmisor podría enviar varias moléculas, las cuales contienen la misma información, y que están sujetas a los motores moleculares que viajan por diferentes vías moleculares y tienen diferentes destinos [103].

6.3.5 Comunicación Usando Señalización de Calcio

La señalización de calcio puede utilizarse para comunicaciones a corta distancia entre nanomáquinas. Similar a los modelos naturales, las nanomáquinas deben estar cerca una de otra. Así como en los modelos naturales, la propagación de la información puede realizarse en dos esquemas diferentes dependiendo del despliegue de las nanomáquinas [103]:

- *Acceso directo*: Si las nanomáquinas están conectadas físicamente, las señales de calcio viajan de una nanomáquina a la siguiente a través de compuertas, como se muestra en la figura 6.5. Estas compuertas deberían funcionar de manera similar a brechas entre junturas, permitiendo así el flujo de iones y moléculas desde una nanomáquina hacia el interior de otra nanomáquina [103].
- *Acceso indirecto*: Si las nanomáquinas no están conectadas físicamente, la nanomáquina transmisora debe ser capaz de enviar moléculas de información al medio como mensajeros en el camino de señales químicas. Las moléculas de información se moverán a través del medio siguiendo un proceso de difusión. Ellas generaran una señal de calcio dentro de la nanomáquina receptora. Los transmisores pueden codificar la información variando la concentración de los primeros mensajeros como se muestra en la figura 6.4. Los sistemas biológicos codifican la información sobre frecuencia y la amplitud de cambios de concentración, referido generalmente como oscilación de calcio y picos de calcio [103].

Estos dos esquemas de propagación permiten la formación de redes que soportan mecanismos de transmisión de multidifusión. El sistema de comunicación promedio funciona de la siguiente manera: las nanomáquinas transmisora y receptora están

conectadas entre sí mediante una red de señalización que consiste de nodos interconectados, los cuales propagan la información usando señales del calcio [103].

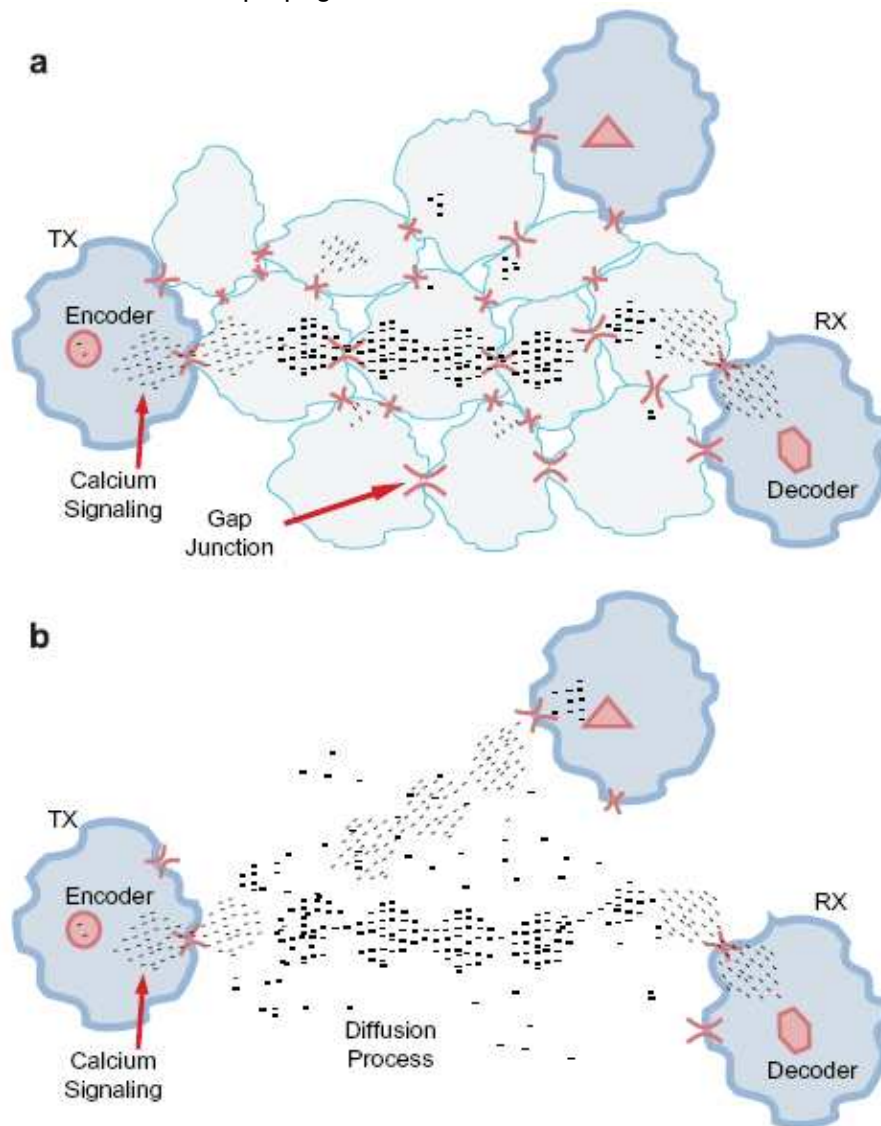


Figura 6.4 Propagación de las señales en un sistema de comunicaciones basado en señalización de calcio
Fuente: Ian F. Akyildiz a, Fernando Brunetti, Cristina Blázquez. *Nanonetworks: A new communication paradigm*

6.4 MONA (Merging Optics and Nanotechnologies) [100]

MONA, es un consorcio que durante dos años ha construido o realizado una proyección del impacto tecnológico y comercial de la nanotecnología (especialmente la nanofotónica) en Europa. En este estudio se muestran los potenciales avances y aplicaciones en los diferentes campos de la electrónica, en la siguiente parte se muestra lo correspondiente a

las telecomunicaciones, que es nuestro campo de interés. Este consorcio consta de las siguientes instituciones y/o empresas (figura 6.5):

	CEA-LETI
	IMEC/Ghent University
	Acreo
	Schott
	Alcatel Thales III-V Lab
	Aixtron
	ASM International
	European Photonics Industry Consortium
	VDI-TZ
	Opticsvalley
	Yole Développement

Figura 6.5 Instituciones y/o empresas que conforman **MONA**.

Fuente: MONA (Merging Optics and Nanotechnologies). A European roadmap for photonics and nanotechnologies

En el trabajo realizado por **MONA**, se han identificado los dispositivos claves para diferentes aplicaciones. En la tabla 6.6 se describen algunas de las estas aplicaciones teniendo Data/Telecom como nuestro interés más grande:

APPLICATIONS (2009 market value)	KEY DEVICES	EU POSITION		RISKS	TECHNICAL RECOMMENDATIONS	BENEFITS
		R&D	Industrial			
Displays (\$90 B)	CNT	+++	+	H	Improve manufacturability	Improved performance (lower power consumption, better image quality)
	Organic LED	++	+	L	Improve packaging	Flexible and thinner displays are possible
Photovoltaics (\$50 B)	Quantum dots III-V based solar cell	+++	+	M	Better QD formation control	Improve efficiency
Imaging (\$10 B)	CMOS image sensors with plasmonics	+++	++	H	Improve photon-plasmon coupling sensitivity	Increased sensitivity in VIS
	III-V QD infrared imager	+++	+++	L	Improve responsivity	Improved performance Potential simpler fabrication process
Lighting (\$6.8B)	ZnO nanowires-based LED	++	++	M	Improve p-doping, carrier injection and manufacturability	Excellent materials quality
	LED with III-V photonic crystal	+++	+++	M	Achieve low-cost process	Optimized light extraction
Data/Telecoms (\$4.5B)	High index contrast Si photonic devices	+++	+	M	Improve packaging and coupling for PICs Integration with silicon. Need for generic technology for a broad range of functionalities	Lower cost More compact devices
	Active fiber with nanoparticles	++	++	M	Improve manufacturability and performance.	Low losses
	Electronic/ photonic integration	+++	++	M	Low-cost, wafer-scale approaches to incorporate III-V devices on Si	Low-cost, high-performance optical links Low-cost optical transceiver possible

Figura 6.6 Campos de aplicación de las nanotecnologías.

Fuente: MONA (Merging Optics and Nanotechnologies). A European roadmap for photonics and nanotechnologies

MONA ha identificado los siguientes campos en los cuales la nanofotónica va a tener su mayor impacto:

- Sensores
- Datos y Telecomunicaciones
- Almacenamiento de Datos
- Displays de pantalla plana
- Tratamiento de Imágenes
- Instrumentación

- LEDs e iluminación
- Interconexión óptica
- Fotovoltaica

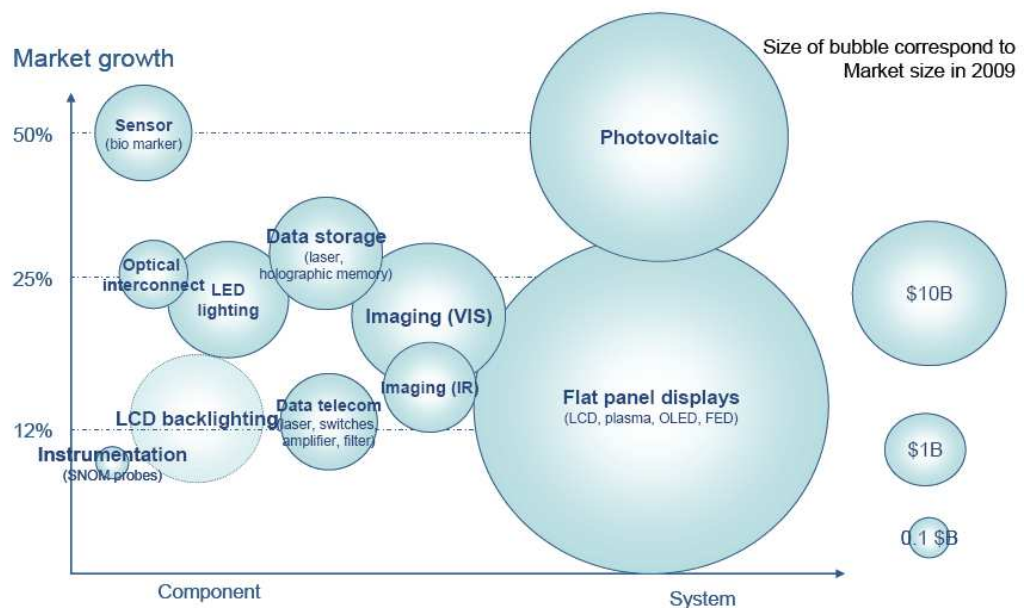


Figura 6.7 Crecimiento del Mercado para las aplicaciones en que se enfoca la nanofotónica.
Fuente: MONA (Merging Optics and Nanotechnologies). A European roadmap for photonics and nanotechnologies

Como se observa en la figura 6.7, el mercado para las Telecomunicaciones es hoy en día es pequeño y tiene un crecimiento lento. El tamaño de las burbujas corresponde al tamaño del mercado para el 2009 y las burbujas en la derecha fuera de la gráfica hacen referencia el tamaño del mercado en billones de dólares.

MONA identifica diferentes dispositivos donde se espera que la nanofotónica tenga un impacto significativo. Se muestran en la tabla 6.8.

Applications	Devices
Datacoms/Telecoms	Laser sources Fibre for transmission. Multiplexers, frequency converters, filters, delay lines, switches, modulators, transceiver Waveguides Amplifier Optical buffer Saturable absorber High index contrast devices Detectors

Figura 6.8 Dispositivos de telecomunicaciones.

Fuente: MONA (Merging Optics and Nanotechnologies). A European roadmap for photonics and nanotechnologies

El tráfico de voz y datos está aumentando cada día de manera significativa, debido al uso de la Internet y de la telefonía móvil. Para hacerle frente a esta demanda de información deben ser mejorados o implementados nuevos métodos de acceso. Algunos dispositivos de la nanofotónica como los siguientes pueden ayudar para resolver estos problemas:

- Láseres con baja corriente de umbral y dependencia de la baja temperatura.
- Arreglos de láser de nanocavidad (basados en cristal fotónico).
- Filtros y switches add-drop para enrutamiento de longitud de onda.
- Amplificadores de fibra óptica con nanopartículas
- Dispositivos de información cuánticos.

6.4.1 Materiales clave para la nanofotónica

Un objetivo de **MONA**, es hacer énfasis en los nanomateriales claves para la nanofotónica en la tabla 6.4 se listan la áreas de aplicación con los dispositivos que se estiman que van a llegar a producción en masa en el 2011 y 2015. La tabla está enfocada lo que respecta al área de las telecomunicaciones.

Sistemas	2011	2015
Nanoestructuras de Si de alto Contraste	Circuitos Integrados fotónicos pasivos Funciones lentas de conmutación Dispositivos Electro-ópticos	Fuentes láseres de micro/nano cavidades Interconexiones ópticas (chip-a-chip) Estructuras de acoplamiento/empaquetamiento de bajo costo Fuentes laser Interconexiones ópticas (intra-chip) Dispositivos pasivos Sensores Sensor Biomolécula Sensor strain/pressure Sensor de concentración Gas/liquido Analizador de espectro integrado
Puntos cuánticos y alambres en III-V	Láseres semiconductores mejorados	Interconexiones ópticas QD laser III-V en Si QD laser III-N para almacenamiento de datos Memoria de QD Láseres de anchura espectral estrecha LEDs basados en III-N con nanoconceptos
Nanoestructuras de alto contraste III-V	Circuitos integrados pasivos fotónicos Reflector 1D de cristal fotónico	LED (AlGaInP) con estructura de cristal fotónico Fuentes laser Dispositivos 2D de cristal fotónico
Fibras Microestructuradas		Fibras microestructuradas para FTTH o aplicaciones Domesticas Fibras microestructuradas para transmisión a larga distancia Fibras microestructuradas para otras aplicaciones
Integración electrónica/fotónica	Transceiver con fuente flip-chip	Transceiver con fuente integrada
Nan partículas en vidrio o polímero	Fibras activas dopadas con nanopartículas 1ra Generación Fibras activas dopadas con nanopartículas 2da Generación	Fibras activas dopadas con nanopartículas 3ra Generación

Tabla 6.4. Aparición de los dispositivos basados en nanofotónica en 2011 y 2015
Fuente: MONA (Merging Optics and Nanotechnologies). A European roadmap for photonics and nanotechnologies

6.4.2 Impacto de los Nanomateriales

En la figura 6.9 se muestra el impacto técnico de los nanomateriales para las diferentes aplicaciones basados en las ventas en dólares (\$), importante destacar que las telecomunicaciones representan una gran parte del mercado teniendo una proyección en ventas de alrededor de 5 billones de dólares.

Es de mayor interés estudiar los nanomateriales en las telecomunicaciones, como se observa, algunos de las estructuras que se explicaron y se dieron a conocer aparecen en esta figura como los CNT (Nanotubos de carbono) y los QD (Puntos cuánticos). Según esta proyección los materiales que tendrán un impacto más fuerte en las telecomunicaciones van a ser las nanopartículas en las fibras (fibras de cristal fotónico) y la integración entre la electrónica y la fotónica, estas estructuras fueron explicadas anteriormente en este trabajo.

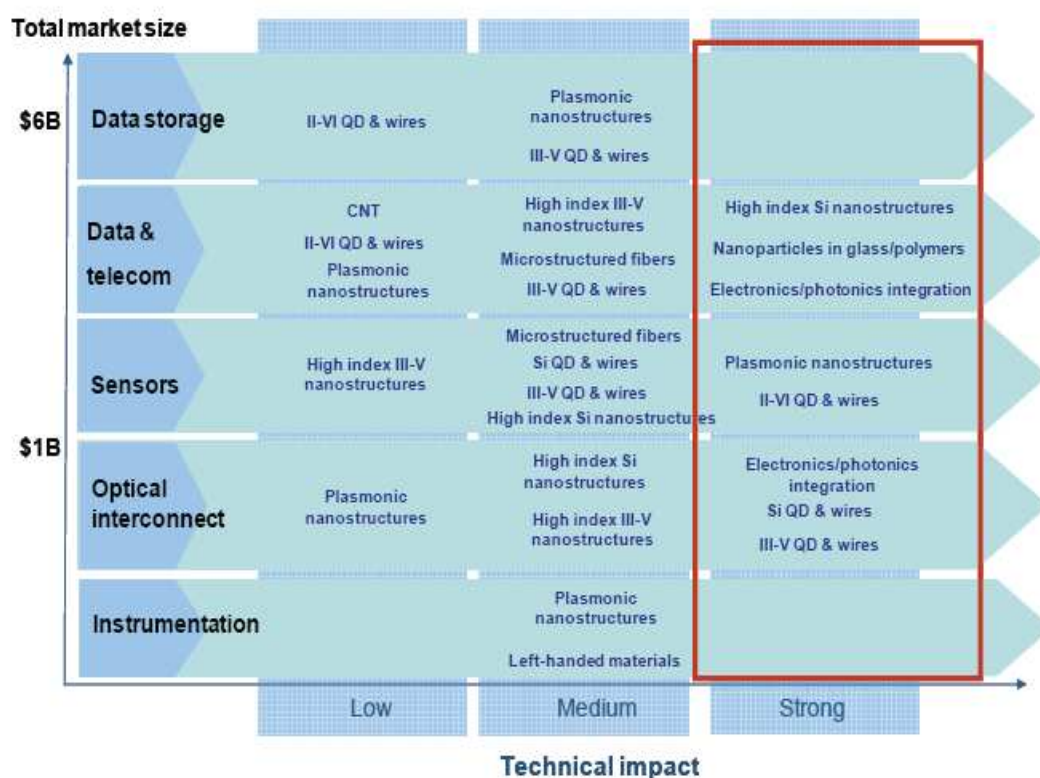


Figura 6.9 Impacto técnico de los nanomateriales por aplicación.

Fuente: MONA (Merging Optics and Nanotechnologies). A European roadmap for photonics and nanotechnologies

6.4.3 Síntesis del reporte para las Telecomunicaciones

En la figura 6.10 se muestra una breve evolución por fases del desarrollo e investigación: básica, aplicada, primeros desarrollos aplicados y producción en masa, que en dos años (2010) promete una revolución total en la forma en que los nuevos dispositivos de telecomunicaciones se van a fabricar y en la forma en que se van a comunicar unos dispositivos con otros.

Application	Datacoms & Telecoms								
Market forecast	The market is forecast to be \$4.4B in 2009 (source BCC/Strategies Unlimited)								
Impact value	Low			Medium			Strong		
Nanophotonic materials/devices <i>Key required type of equipment process</i>	1.CNT <i>Laser ablation</i> 2.II-VI QD & wires 3.Plasmonics			1.III-V QD & wires for semiconductor lasers <i>MOCVD</i> <i>MBE</i> <i>UV lithography</i> 2.Microstructured fibres for FTTH application 3.PhC & high index contrast nanostructures in Si/III-V			1.Electronic/photonic integration for transceivers <i>UV lithography</i> 2.PhC & high index contrast nanostructures in Si <i>UV lithography</i> <i>e-beam lithography</i> <i>NIL</i> <i>Dry etching</i> 3.Nanoparticles in glass or polymer		
Timelines for key nanomaterials/devices	<u>Electronics / Photonic integration for transceivers (no WDM) :</u>								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	<u>Electronics / Photonic integration for transceivers (with WDM) :</u>								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	<u>Electronics / Photonic integration for transceivers with integrated source:</u>								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	<u>Passive photonic integrated circuits :</u>								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	<u>Micro/nano-cavity laser sources :</u>								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	<u>Slow switching/tuning functions :</u>								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	<u>Electro-optical devices :</u>								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	<u>All-optical devices :</u>								
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
	<u>Nanoparticles for active fibers (1st generation) :</u>								
2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
<u>Nanoparticles for active fibers (2nd generation) :</u>									
2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
<u>Nanoparticles for active fibers (3rd generation) :</u>									
2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	

Figura 6.10 Síntesis del reporte para las Telecomunicaciones.

Fuente: MONA (Merging Optics and Nanotechnologies). A European roadmap for photonics and nanotechnologies

Reseña

	Desarrollo e Investigación Básica
	Desarrollo e Investigación Aplicada
	Primeras Aplicaciones
	Producción en Masa

7.0 CONCLUSIONES

Debido al crecimiento tecnológico que se ha tenido en los últimos 50 años en todos los campos de la Ingeniería y en especial en el área de la electrónica y de las telecomunicaciones, observamos hoy por hoy muchos dispositivos electrónicos desde el más complejo al más simple, los investigadores y la industria están en la búsqueda constante de nuevos materiales físico/químicos que se adapten a los nuevos retos tecnológicos, con el fin de fabricar nuevos productos que se ajusten a las necesidades de un mundo cambiante y exigente que reclama día a día nuevos dispositivos, que tengan una confiabilidad por encima 99,99%, resistentes a la temperatura en todo tipo lugares, un rendimiento favorable que va ligado a las aplicaciones que se requieran y con bajos costos.

Como se ha venido observando a nivel mundial en los últimos años el auge y crecimiento económico de la tecnología de los gigantes asiáticos tampoco es indiferente a la Nanotecnología, como se observó en la primera parte del documento países como China y Corea del Sur, son los que lideran las investigaciones en este campo, es hora que a nivel de universidades se den cuenta que, lo que antes era una teoría, una fantasía, en estos momentos es la gran esperanza de hacer frente a una nueva era tecnológica.

En el campo de las telecomunicaciones la Nanotecnología como ciencia dará muchos cambios favorables al campo de la ingeniería. Los dispositivos de telecomunicaciones estarán revolucionándose a tal punto que problemas que hoy en día tenemos como pérdidas considerables, problemas de difracción, atenuación, estabilidad, problemas de enrutamiento, velocidad de transmisión, capacidad de almacenamiento, entre otras, podrán ser resueltos a futuro.

La Nanotecnología aportará al área de las telecomunicaciones sin lugar a duda, nuevos campos de estudios enfocados al desarrollo y construcción de nuevos componentes capaces de mejorar significativamente el transporte de grandes volúmenes de transmisión y recepción de información que hoy por hoy crece exponencialmente de forma general. La nanotecnología permitirá nuevos desarrollos de aplicaciones telemáticas, protocolos de comunicaciones, enrutamiento de información, convergencia y transferencia de nuevos servicios altamente eficiente.

El área de la Nanofotónica (nanoóptica) se muestra como la ciencia que podrá derribar barreras hasta hace unos pocos años consideradas imposibles (es mas ya se está haciendo), con su promesa de solucionar los problemas con el límite de difracción. Estamos obligados como ingenieros a seguir investigando y adquiriendo conocimientos sobre la nueva óptica, si queremos hacer frente a los retos que nos presenta el desarrollo de mejores y más rápidas formas de transportar información ya sea a larga distancia (redes, Internet, enlaces

interoceánicos) o chip a chip, lo cual con la miniaturización de los dispositivos ópticos ya no va a ser tarea exclusiva del intercambio de electrones.

Una visión futurista de cómo van a ser las comunicaciones son las nanoredes, con ellas se cambiara el modo en que los dispositivos intercambian información, permitiendo a nuestros dispositivos de comunicación tener un tamaño mucho más reducido de los actuales y un consumo de energía muy pequeño. Las nanoredes y la comunicación molecular son todavía algo inalcanzable pero en el futuro será algo cotidiano.

8.0 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Nanotecnología: ¿Qué es? Concepto, definición, significado. *Diccionario National Nanotechnology Initiative (NNI)*. http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/nanotecnologia_que_es.htm.
- [2] Minoli, Daniel. *Nanotechnology Applications to Telecommunications and Networking*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2006.
- [3] Szocs, Sebastian. *Latin Insights @ Intel*. Agosto 21, 2008. http://blogs.intel.com/latininsights/2008/08/90nm_65nm_45nm_porque_me_impor.php
- [4] Bourzac, Katherine. Sticky Nanotape. *Technology Published by MIT*. Octubre 09 2008. <http://www.technologyreview.com/communications/21508/?a=f>
- [5] About the NNI. *The National Nanotechnology Initiative (NNI)*. http://www.nano.gov/html/about/home_about.html
- [6] D. Leff, The Truth About Nanotechnology, ZDNet Australia, Dec. 6, 2002, info@zdnnet.com.au.
- [7] M. Kanellos, HP to Unveil Nanotech Breakthrough, ZDNet, Sept. 9, 2002, ZDNet Australia, Pyrmont, Australia, info@zdnnet.com.au.
- [8] C. Warris, *Nanotechnology Benchmarking Project*, Australian Academy of Science, Feb. 2004.
- [9] S. Olson, Nanotechnology Conference of March 31–April 2, 2004 Emphasizes Molecular Electronics, NanoApex Corp. /RAWNET Co., Cleveland, OH, News.nanoapex.com.
- [10] R. Merke, Nanotechnology, <http://www.zyvex.com/nano/>.
- [11] Promotional Material, Darmstadt University of Technology, Institute of Materials Science, Thin Films Division, Darmstadt, Germany.
- [12] E. Giannelis, Discovering Materials Science and Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Cornell University, Ithaca, NY. <http://www.mse.-cornell.edu>
- [13] DFG-Center for Functional Nanostructures(CFN), Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, Germany. <http://www.cfn.uni-karlsruhe.de/projects.html>.
- [14] University of California at Berkeley, MEMS and Nano, Promotional Material.
- [15] J. Walker, Nanotechnology in Manufacturing, Fourmilab, Switzerland, Jan. 15, 2004.

- [16] G. D. Skidmore, E. Parker, M. Ellis, N. Sarkar, and R. Merkle, Exponential Assembly, Zyvex Corporation, Richardson, TX.
- [17] Y. Tzeng, ELEC 7970: Special Topics in Electrical Engineering on Nanoscale Science and Technology, Outline, Summer 2003, Electrical and Computer Engineering, Auburn University, Auburn, AL, tzengy@eng.auburn.edu.
- [18] Quantum Glossary, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, U.K., enquiry@npl.co.uk.
- [19] R. F. W. Bader, *An Introduction to the Electronic Structure of Atoms and Molecules*, Clarke Irwin, 1970.
- [20] R. F. W. Bader, *Theory of Atoms in Molecules*, Oxford University Press, 1995.
- [21] Promotional Material, Quantum Dot Corporation, Hayward, CA, <http://www.qdots.com>.
- [22] Staff, The Foundations of Next-Generation Electronics: Condensed-Matter Physics at RLE, *RLE Currents* 10 (2) (1998).
- [23] *Science Week*, ScienceWeek/Spectrum Press, Chicago, IL, editors@scienceweek.com
- [24] G. M. Whitesides and J. C. Love, On Nanofabrication and Nanotechnology, *Sci. Am.* Sept. 2001.
- [25] Staff, Duke University Chemists Describe New Kind of “Nanotube” Transistor, *Ascribe Newswire*, Mar. 29, 2004.
- [26] N. Stutzmann et al. Self-Aligned, Vertical-Channel, Polymer Field-Effect Transistors, *Science* 299, 1881 (2003).
- [27] R. Mezzenga et al., Templating Organic Semiconductors via Self-Assembly of Polymer Colloids, *Science* 299, 1872 (2003).
- [28] A-M. Birac, Chief Editor, Clefs CEA no 44, Commissariat a L’Energie Atomique, France.
- [29] G. Dan Hutcheson, The First Nanochips, *Sci. Am.*, Apr. 2004, pp. 76–83.
- [30] N. Mokhoff, Nanotech Forum Reflects on Technology’s Mission, *EE Times*, Sept. 11, 2003.
- [31] D. Foty and M. Bucher, New Techniques for Modern Analog Design: CMOS Design Methodologies and the EKV MOSFET Model, 9th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems—ICECS 2002, Sept. 15–18, 2002, Dubrovnik, Croatia.

- [32] Y. J. Choi, CMOSFET Below 0.1 μm : Suppression of Short Channel Effect, SMDL Annual Report, School of Electrical Engineering, Seoul National University, 1998.
- [33] M. G. Peters, S. G. den Hartoga, and J. I. Dijkhuisb, Single Electron Tunneling and Suppression of Short-Channel Effects in Submicron Silicon Transistors, *J. Appl. Phys.* 84 (91) (1998).
- [34] Center for Nanoscale Science and Technology at Rice University.
- [35] S. Pratsinis, Nanoparticles: Synthesis and Applications, 2004 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, Nanotech 2004, Mar. 7–11, 2004, Boston, MA.
- [36] M. Arakawa: *J. Soc. Powder Technol., Jpn*, 42, 582–585 (2005)
- [37] N. Wada: *Chem. Eng.*, 9, 17–21 (1984).
- [38] I. Matsui: *J. Chem. Eng., Jpn*, 38 (8), 535–546 (2005).
- [39] M. Takashige, T. Nakamura: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 20, 43–46 (1981).
- [40] K. Ishikawa: *J. Soc. Powder Technol., Jpn*, 38, 731–740 (2001).
- [41] M. Haruta: *Catalysts*, 36 (6) 310–318 (1994).
- [42] Y. Kurokawa, Y. Hosoya: *Surface*, 34 (2) 100–106 (1996).
- [43] K. Kobayashi: *J. Soc. Powder Technol., Jpn*, 41, 473–478 (2004).
- [44] K. Niihara: *J. Ceram. Soc. Jpn*, 99 (10), 974–982 (1991).
- [45] T. Sekino: *Mater. Integr.*, 13 (11) 50–54 (2000).
- [46] F. Wakai, Y. Kodama, S. Sakaguchi, N. Murayama, K. Izaki and K. Niihara: *Nature*, 344, 6265, 421–423 (29 March 1990).
- [47] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. Hiura, J. W. Bennett, H. F. Ghaemi, and T. Thio, Electrical-Conductivity of Individual Carbon Nanotubes, *Nature* 382, 54 (1996).
- [48] Carbon Nanotechnologies, Houston, TX, BusDev@cnanotech.com, <http://www.cnanotech.com>.
- [49] D. Tomanek, Morphology, Growth and Destruction of Carbon Nanotubes, American Physical Society (APS) March Meeting, Kansas City, MO. 1997.
- [50] H. R. Sadeghpour, B. E. Granger, and P. Král, Interaction of Laser Light and Electrons with Nanotubes, 2004 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, Nanotech 2004, March 7–11, 2004, Boston, MA.

- [51] Charles P. Poole, Jr. Frank J. Owens. Introduction to Nanotechnology. Jhon Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [52] B. H. Hong et al., Fabrication of Silver Nanowires, *Science* 294, 348 (2001).
- [53] P. J. F. Harris, S. C. Tsang, et al., High-Resolution Electron Microscope Studies of a Microporous Carbon Produced by Arc-Evaporation, *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* 90, 2799 (1994).
- [54] M. A. Reed, Quantum Dots, *Sci. Am.*, Jan. 1993, pp.118–123.
- [55] M. A. Kastner, Artificial Atoms, *Phys. Today*, Jan. 1993, pp. 24–31.
- [56] D. Loss and D. P. DiVincenzo, Quantum Computation with Quantum Dots, *Phys. Rev. A* 57, 120 (1998).
- [57] Nanotechnology Glossary, Smalltimes, Small Time Media, Ann Arbor, MI.
- [58] D. Gammon and D. G. Steel, On Quantum Dots, *Phys. Today*, Oct. 2002.
- [59] The Nano-Optics Group, University of Rochester's Institute of Optics, Rochester, NY.
- [60] S. M. Reimann and M. Manninen, Finite Fermion Systems, *Rev. Mod. Phys.* 74, 1283ON (2002).
- [61] P. A. Orellana, F. Domínguez-Adame, I. Gómez, and M. L. Ladrón de Guevara, Transport Through a Quantum Wire with a Side Quantum-Dot Array, *Phys. Rev. B* 67 (2003).
- [62] J. M. Elzerman, R. Hanson, J. S. Greidanus, L. H. Willems van Beveren, S. De Franceschi, L. M. K. Vandersypen, S. Tarucha, and L. P. Kouwenhoven, Mesoscopic Systems and Quantum Hall Effect, *Phys. Rev. B* 67, 161308I (2003).
- [63] Staff, Quantum Dots, The Delft Spin Qubit Project, Kavli Institute of Nanoscience Delft, The Faculty of Applied Sciences at Delft University of Technology, Delft, <http://qt.tn.tudelft.nl/research/qdots/>.
- [64] M. Victor, Self-Assembled Quantum Dots for Advanced Semiconductor Laser Diodes, K. U. Leuven IWETO-researchdatabase, Solid State Physics and Magnetism Section, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.
- [65] N. Kane, Advanced Diamond Technologies, Chicago, IL, www.thindiamond.com.
- [66] S-G. Liu, J. E. Dahl, and R. M. K. Carlson, Diamondoid Derivatization Chemistry—Towards Nanotechnology Application, 2004 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show, Nanotech 2004, Mar. 7–11, 2004, Boston, MA.
- [67] A. Hult, Thin Film, KTH, Campus Valhallavägen, Besöksadress: Valhallavägen 79, Postadress: Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm.

- [68] N. P. Padture, Nanotechnology, Dept. of Metallurgy and Materials Engineering, Institute of Materials Science, University of Connecticut, Storrs, CT.
- [69] Staff, Duke University Engineers Fabricating Polymer “Nanobrushes,” *Nanotechnology News*, Mar. 30, 2004.
- [70] Staff, Manufacturing Upheaval, Responsible Nanotechnology, Mar. 28, 2004.
- [71] M. Rieth and W. Schommers, Ed., *Handbook of Theoretical and Computational Nanotechnology*, American Scientific Publishers, Stevenson Ranch, CA.
- [72] D. J. Paul, Nanoelectronics, Cavendish Laboratory Paper, University of Cambridge, Madingley Road, Cambridge, U.K.
- [73] E. Forsén, Organic Molecular Electronics—Biotronics, May 28, 2000, Technical University of Denmark, Department of Micro and Nanotechnology, <http://www.Mic.dtu.dk>.
- [74] M. A. Reed, Molecular—Scale Electronics, *Proc. IEEE* 87(4), 652–658 (1999).
- [75] J. Tour et al., Are Molecular Wires Conducting? *Science* 271, 1705–1707 (1996).
- [76] Staff, Quantum Computation: A Great Challenge with a Wonderful Promise, The Delft Spin Qubit Project, Kavli Institute of Nanoscience Delft, The Faculty of Applied Sciences at Delft University of Technology, Delft, <http://qt.tn.tudelft.nl/research/qc/>.
- [77] M. Bayer, Quantum Dots and Quantum Information Processing, *Nature* 418, 597 (2002).
- [78]. Townes, C.H. 1999. *How the Laser Happened*. London: Oxford University Press.
- [79]. Optoelectronics Industry and Technology Development Association. 1998. *Report on Photonics Technology Road Map: Information Storage*.
- [80]. Ohtsu, M.(ed). 2006. *Progress in Nano-Electro-Optics V*, Springer-Verlag, Preface to Volume V: Based on “nanophotonics” proposed by Ohtsu in 1993, OITDA (Optical Industry Technology Development Association, Japan) organized the nanophotonics technical group in 1994, and discussions on the future direction of nanophotonics were started in collaboration with academia and industry.
- [81]. Nishida, T., Matsumoto, T., Akagi, F., Hieda, H., Kikitsu, A., Naito, K., Koda, T., Nishida, N., Hatano, H., and Hirata, M. 2007. Hybrid recording on bit-patterned media by using a near-field optical head. *J. Nanophotonics* 2: to be published.
- [82]. Naruse, M, Miyazaki, T., Kawazoe, T., Sangu, S., Kobayashi, K., Kubota, F., and Ohtsu, M. 2005. Nanophotonic Computing Based on Optical Near-Field Interactions between QDs. *IEICE Transaction. Electron.* E88-C: 1817–1823.

- [83]. Inao, Y., Nakasato, S., Kuroda, R., and Ohtsu, M. 2007. Nonadiabatic photochemical reaction and application to photolithography. *Microelectronic Engineering* 84: 705–710.
- [84]. Matsuda, K., Saiki, T., Saito, H., and Nishi, K. 2000. Room temperature photoluminescence spectroscopy of a single $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ QDs by using highly sensitive near-field scanning optical microscope. *Appl. Phys. Lett.* 76: 73–75.
- [85]. Fukuda, H., Saiki, T., and Ohtsu, M. 2001. Diagnostics of Semiconductor Devices beyond the Diffraction Limit of Light. *Sensors and Materials* 13: 445–460.
- [86]. Hosaka, N. and Saiki, T. 2001. Near-field fluorescence imaging of single molecules with a resolution in the range of 10 nm. *J. Microscopy* 202: 362–364.
- [87]. Ushiki, T. 2005. Scanning near-field optical/atomic force microscopy in biology. *Abstracts of the 5th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics*, 5. Optical Society of Japan.
- [88]. Narita, Y., Tadokoro, T., Ikeda, T., Saiki, T., Mononobe, S., and Ohtsu, M. 1998. Near-Field Raman Spectral Measurement of Polydiacetylene. *Appl. Spectroscopy* 52: 1141–1144.
- [89]. Sato, F. 2004. Development of a time-resolved near field scanning optical microscope by time-correlated single photon measurement. *Jasco Report* 46: 34–38.
- [90]. Naruse, M., Yatsui, T., Nomura, W., Hirose, N., and Ohtsu, M. 2005. Hierarchy in optical near-fields and its application to memory retrieval. *Opt. Express* 13: 9265–9271.
- [91]. Naruse, M., Hori, H., Kobayashi, K., and Ohtsu, M. 2007. Tamper resistance in optical excitation transfer based on optical near-field interactions. *Optics Letters* 32: 1761–1763.
- [92]. Naruse, M., Kawazoe, T., Yatsui, T., Sangu, S., Kobayashi, K., and Ohtsu, M. 2006. Architectural Approach in Nanophotonics for Information and Communication Systems. In *Progress in Nano-Electro-Optics V*, ed. M. Ohtsu, 163–182. Berlin: Springer-Verlag.
- [93]. Kawazoe, T., Kobayashi, K., Takubo, S., and Ohtsu, M. 2005. Nonadiabatic photodissociation process using an optical near field. *J. Chem. Phys.* 122: 024715 1–5.
- [94]. Ohtsu, M. 1998. *Near-Field Nano/Atom Optics and Technology*, 218–293. Springer-Verlag.
- [95]. Kobayashi, K., Sangu, S., Ito, H., and Ohtsu, M. 2001. Near-field optical potential for a neutral atom. *Phys. Rev. A* 63: 013806 1–9.
- [96]. Ito, H., Nakata, T., Sakaki, K., Ohtsu, M., Lee, K.I., and Jhe, W. 1996. Laser Spectroscopy of Atoms Guided by Evanescent Waves in Micron-Sized Hollow Optical Fibers. *Phys. Rev. Lett.* 76: 4500–4503.

- [97]. Totsuka, K., Ito, H., Kawamura, T., and Ohtsu, M. 2003. High spatial resolution atom detector with two-color optical near fields. *Jpn. J. Appl. Phys.* 41: 1566–1571.
- [98]. Totsuka, K., Ito, H., Suzuki, K., Yamamoto, K., Ohtsu, M., and Yatsui, T. 2003. A slit-type atom deflector with near-field light. *Appl. Phys. Lett.* 82: 1616–1618.
- [99]. Takamizawa, A., Ito, H., Yamada, S., and Ohtsu, M., 2004. Observation of cold atom output from an evanescent-light funnel. *Appl. Phys. Lett.* 85: 1790–1792.
- [100] MONA (Merging Optics and Nanotechnologies). A European roadmap for photonics and nanotechnologies. March 2008. Paris, France.
- [101]. http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/3857/1/paper_jgarcia.pdf.
- [102]. http://h41131.www4.hp.com/es/es/stories/La_novedosa_arquitectura_informtica_podra_producir_chips_menos_costosos.html
- [103]. Ian F. Akyildiz a, Fernando Brunetti, Cristina Blázquez. Nanonetworks: A new communication paradigm. 6 April 2008.
- [104]. R.A. Freitas, Nanomedicine, Volume I: Basic Capabilities. Landes Bioscience, 1999.
- [105]. M. Moore, A. Enomoto, T. Nakano, R. Egashira, T. Suda, A. Kayasuga, H. Kojima, H. Sakakibara, K. Oiwa, A design of a molecular communication system for nanomachines using molecular motors, in Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'06), March, 2006.
- [106]. M. Moore, A. Enomoto, T. Nakano, Y. Okaie, T. Suda, Interfacing with nanomachines through molecular communication, in: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 2007, pp. 18–23.
- [107]. M.J. Berridge, The AM and FM of calcium signalling, *Nature* 386 (April) (1997) 759–780.
- [108]. S. Hiyama, Y. Moritani, T. Suda, R. Egashira, A. Enomoto, M. Moore, T. Nakano, Molecular communication, in: Proceedings of the NSTI Nanotechnology Conference, October 2005.
- [109]. E. Drexler, Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation, John Wiley and Sons Inc., 1992.
- [110]. C. Bauschlicher, A. Ricca, R. Merkle, Chemical storage of data, *Nanotechnology* 8 (March) (1997) 1–5.

- [111]. T. Nakano, T. Suda, M. Moore, R. Egashira, A. Enomoto, K. Arima, Molecular communication for nanomachines using intercellular calcium signaling, in: Proceedings of the Fifth IEEE Conference on Nanotechnology, June 2005, pp. 478–481.
- [112]. Y. Moritani, S. Hiyama, T. Suda, Molecular communication for health care applications, in: Proceedings of the Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'06), March 2006.
- [113]. E. Carafoli, Calcium signaling: a tale for all seasons, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 99 (3) (2002) 1115–1122.
- [114]. M. Ohtsu, K. Kobayashi, T. Kawazoe, T. Yatsui, M. Naruse. Principles of Nanophotonics. Taylor & Francis Group LLC 2008.
- [115]. http://www.allaboutcircuits.com/vol_3/chpt_2/14.html
- [116]. W Konstantin Likharev is a Distinguished Professor of Physics at the State University of New York at Stony Brook. The Forum department is initiated by the American Physical Society's Forum on Industrial and Applied Physics (FIAP). For more information about the Forum, please visit the FIAP Web site, or contact the chair, Kenneth C. Hass.
<http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-9/iss-3/p20.html>

9.0 ANEXOS

Terminología clave:

- **Nano:** proviene del griego y significa “enano”, este término indica dimensiones físicas en el rango de 10^{-9} de un metro
- **Amu:** Unidad de Masa Atómica. 1 Amu, es igual a una doceava parte de la masa de carbono de un átomo-12.
- **Semiconductancia:** se determina según los átomos de otros elementos en el material semiconductor, los átomos introducidos en el semiconductor de otro elemento trabajan como impurezas generando los huecos que hacen que un material sea semiconductor.
- **Compuerta Booleana:** dispositivo electrónico que es la expresión física de un operador booleano en la lógica de conmutación.
- **Transconductancia:** Relación entre la corriente de salida y la tensión de entrada. Sirve para medir hasta qué punto la tensión de entrada controla la corriente de salida.
- **Ferroeléctricos:** La capacidad de ciertos materiales para retener información en su estructura cristalina, sin necesidad de estar conectados a una fuente de energía, como pilas o corriente eléctrica, es llamada. Ejemplo Memorias.
- **Plasmones:** son un tipo de excitación elemental en sólidos. Son fotones que al llegar a la superficie de un material quedan atraídos y atrapados por electrones libres, que los transportan por el interior del sólido. Estas “partículas” pueden ser utilizadas para transportar la luz a través de una lámina.
- **Micronización:** es la aplicación de presión. Lo cual significa más energía de micronización que origina partículas.
- **Fullerenses:** son la tercera forma más estable del carbono, tras el diamante y el grafito.
- **Graphene:** es el material más común usado en la mayoría de los lápices, se compone de un sin número de capas de grafito.
- **Quirales:** proviene del griego *cheir*, que significa mano. Se dice que los objetos quirales se parecen a las manos. Así, las moléculas quirales se relacionan entre sí de igual forma que lo hace la mano izquierda con su mano derecha. Ambas coinciden en un espejo pero nunca podríamos superponer una sobre la otra.
- **Fermiones:** llamado así en honor al célebre científico italiano Enrico Fermi, es uno de los dos tipos básicos de partículas que existen en la naturaleza. Los fermiones se caracterizan por tener spin semi-entero ($1/2, 3/2, \dots$).

- **Tiol:** En química orgánica, un **tiol** es un compuesto que contiene el grupo funcional formado por un átomo de azufre y un átomo de hidrógeno (-SH). Siendo el azufre análogo de un grupo alcohol (-OH), este grupo funcional es llamado *grupo tiol* o *grupo sulfhidrilo*. Tradicionalmente los tioles son denominados **mercaptanos**.
- **Polisulfuro:** son sales que contienen aniones lineales del tipo S_n^{2-} . Se forman por ataque del anión sulfuro sobre el azufre elemental (S_8) o por oxidación de sulfuros uniéndose de esta manera dos átomos de azufre.
- **Polifenilenos:** Composiciones de revestimiento a base de compuestos macromoleculares orgánicos obtenidos por reacciones distintas a aquellas en las que intervienen solamente enlaces insaturados carbono-carbono.
- **Polythiophenes:** familia de los Polímero (macromoléculas), que pueden ser conductores de electrones.
- **Exitón:** es una cuasipartícula (o excitación elemental) de los sólidos, formada por un electrón y un hueco ligados a través de la interacción coulombiana. Se da únicamente en semiconductores y aislantes.
- **Polaritones:** quasipartículas resultantes de la fuerte interacción entre luz y materia en este tipo de heteroestructuras bidimensionales, poseen un espín entero.