

¿QUÉ ES LA NANOELÉTRÓNICA?

Antonio Hernández Cabrera

La civilización moderna se sostiene sobre una enorme variedad de materiales: cientos, si no miles, de metales y sus aleaciones, plásticos y todo tipo de materiales naturales como rocas o maderas. Sin embargo, la industria electrónica parece ser una excepción. Probablemente, más del 99.9% de los millones de transistores utilizados en los hogares medios de un país desarrollado están hechos de silicio. A pesar de ello, los semiconductores compuestos, utilizados inicialmente en los componentes electrónicos de alta velocidad y en optoelectrónica están abriéndose un hueco mayor que el indicado por los datos del mercado. A ellos y sus aplicaciones se dedica este ensayo.

1. Introducción histórica

Existe un gran contraste entre la ciencia y la tecnología de los metales y los semiconductores antes y después de 1970. Durante la década de los años 30 el silicio se situó como el principal semiconductor, desde que A. H. Wilson aplicó la teoría de bandas de Bloch para explicar el papel fundamental del gap (región prohibida) de energía. En la década de los años 50 J. M. Luttinger y W. Kohn concluyeron la moderna teoría de la estructura electrónica de los dopantes. A caballo entre los 40 y los 50 se inventó, en los laboratorios de la Bell, el *transistor bipolar de silicio*, que funciona como un amplificador. En los años 60 se crea el transistor de efecto de campo que, junto a la idea de R. Noyce y J. Kilby de fabricar resistores y capacitores de silicio, dio lugar a los *circuitos integrados*. El impacto de este último invento en nuestra vida cotidiana no ha tenido parangón con ningún otro ejemplo de la ciencia y tecnología. Desde 1970 a 1990 el progreso de la tecnología del silicio ha sido imparable, requiriéndose escalas logarítmicas para representar su avance. En el mismo debe tenerse en cuenta el aumento de la potencia de computación por unidad de área de los chips o la reducción de costes por transistor. Ésto se ha visto acompañado por el decrecimiento exponencial del tamaño de los dispositivos. El cambio ha sido continuo con las múltiples reducciones de tamaño de los transistores, desde fracciones de milímetro en 1960 a fracciones de micra hoy en día. Pero el semiconductor en el corazón de los chips ha seguido siendo el silicio hasta 1970.

68

2. Las nanoestructuras mecanocuánticas

En 1970 Leo Esaki y Raymond Tsu publicaron su artículo "Superred y conductividad diferencial negativa en semiconductores" (IBM Journal of Research and Development, 14, 61-65). En él introdujeron el concepto de *superred* y describieron un nuevo efecto físico: la corriente decrece al aumentar el potencial

aplicado. Desde entonces, la ciencia de los semi-conductores no ha sido la misma. Una *superred* consiste en una superposición periódica y precisa de láminas delgadas de, al menos, dos semiconductores diferentes. La energía de los electrones (la llamada estructura de bandas) en el silicio y otros materiales se obtiene resolviendo la ecuación de Schrödinger apropiada, con un potencial que emule la periodicidad subyacente de la red semiconductor; con la periodicidad artificial de la superred aparece una nueva estructura de bandas. Esaki y Tsu predijeron una serie de curiosas propiedades electrónicas, dando lugar al comienzo de una nueva carrera investigadora en todo el mundo, inicialmente dirigida al crecimiento de las superredes. Ahora se ha alcanzado un nivel en el que determinadas multicapas semiconductoras pueden prepararse capa a capa atómica, controlando independientemente tanto la composición como el dopaje de cada capa. Irónicamente, la conductividad diferencial negativa ha sido una ilusión hasta muy recientemente (y el efecto ha sido sorprendentemente complejo, yendo más allá del simple análisis inicial). Aunque ya se haya observado, el fenómeno es muy delicado. Sin embargo, parece un prometedor candidato para futuras aplicaciones.

3. La física

68 La física subyacente en la nanoelectrónica surge de una consideración básica: la escala de tamaños. Si uno examina los libros de texto de estado sólido con la intención de comprender la conductividad, por poner un ejemplo, se puede encontrar con la teoría establecida hace 150 años por Boltzmann. En ella se supone que existen tres escalas de longitud muy distintas en magnitud: el diámetro de un átomo o molécula, a , el recorrido libre medio l de un electrón entre colisiones o dispersiones, y el tamaño L de la muestra. Normalmente suponemos que $a \ll l \ll L$. La estructura de la teoría de Boltzmann para la conductividad es similar a la teoría cinética de los gases, donde el tamaño del átomo o molécula es mucho menor que el recorrido libre medio entre colisiones que, a su vez es, es mucho menor que el recipiente que contiene al gas. Así, podemos pasar a promediar estadísticamente: la densidad de un gas tiene significado en un recipiente grande, pero no en un capilar extremadamente fino. En una *microestructura semiconductor* no va a existir una separación tan nítida en las escalas de longitud, yéndose al garete muchas de las posibles hipótesis. Pensemos en una muestra cuyo tamaño es sólo de unas pocas capas atómicas en cierta dirección.

4. Las matemáticas

La mecánica cuántica tiene un papel fundamental en la determinación de los niveles de energía electrónicos y el consiguiente funcionamiento de las microestructuras. En dirección espacial de interés, la de crecimiento, el movimiento electrónico puede ser balístico, en lugar de difusivo, como ocurre en los sólidos macroscópicos. Y aquí incluyo un mensaje para los matemáticos: toda la ciencia para el estudio de la nanotecnología se basa en la resolución de

una ecuación diferencial no lineal de segundo orden: la ecuación de Heisenberg. O mejor aún, la ecuación de von Neumann-Liouville o ecuación cuántica de Liouville.

El formalismo de la ecuación cuántica de Liouville, o de la matriz de densidad, en la representación de momentos, determina que la densidad de probabilidad electrónica en cualquier sistema, evoluciona en el tiempo como:

$$\frac{\partial \hat{\rho}_{\vec{p}t}}{\partial t} + \frac{i}{\hbar} [\hat{h} + \hat{\varphi}_t, \hat{\rho}_{\vec{p}t}] = \hat{I}_{\vec{p}t} + \hat{G}_{\vec{p}t} ,$$

donde los términos que aparecen en la ecuación tienen los siguientes significados:

\hat{h} = matriz de energía potencial

$\hat{\varphi}_t = \hat{\varphi}_t^0 + \hat{\sigma}_z \varphi_t^z$ = matriz de energía potencial Hartree

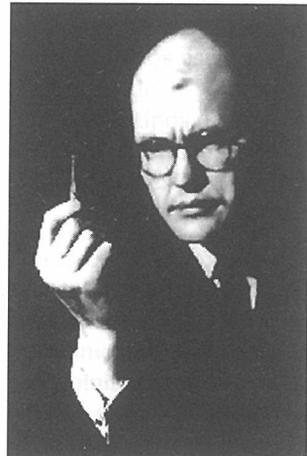
$\hat{I}_{\vec{p}t}$ = matriz de dispersión

$\hat{G}_{\vec{p}t}$ = matriz de generación de portadores

$\hat{\rho}_{\vec{p}t}$ = matriz de densidad electrónica

La matriz de energía potencial, obtenida directamente de la ecuación de Schrödinger, nos describe la estructura del material, detallando los estados electrónicos. La matriz de densidad electrónica detalla la evolución temporal de la concentración de portadores de carga generados mediante algún procedimiento, ya sea fotoexcitación, inyección, etc. La matriz de generación describe cómo se han generado dichos portadores. La matriz del potencial Hartree da cuenta de como interactúan entre sí, siendo importante a elevadas concentraciones. Por último, la matriz de dispersión explica las razones por las que las señales se disipan a causa de diversos fenómenos, como pueden ser los térmicos, etc. No voy a profundizar en las matemáticas del asunto dada su complejidad. Sólo señalar el enorme potencial que pone en nuestras manos este formalismo, y que nos permite adentrarnos en el conocimiento del comportamiento íntimo de una parte de la naturaleza.

68



Jack St. Clair Kilby. Premio Nobel de Física 2000 por la invención del circuito integrado.

Bibliografía

Grahn, H. T. (Ed.): *Semiconductor superlattices*. World Scientific, Londres, 1995.

Hernández-Cabrera, A. y Aceituno, P.: *Phys. Rev. B* 61, 2000.

Kelly, M. J.: *Low-dimensional semiconductors: materials, physics, technology and devices*. Oxford Science Publications, 1995.