

TỔNG QUAN VỀ LINH KIỆN ĐIỆN TỬ NANÔ

Đinh Sỹ Hiền, Đinh Việt Nga

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên – Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh

(Bài nhận ngày 27 tháng 7 năm 2004, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 22 tháng 12 năm 2004)

TÓM TẮT: Bài báo này tổng quan về những nghiên cứu mở rộng theo hướng các linh kiện chuyển mạch của điện tử nanô dùng trong các mạch số. Đặc biệt, hai loại transistor trường được khảo sát: (1) linh kiện bán dẫn đơn điện tử và hiệu ứng lượng tử và (2) những linh kiện điện tử phân tử. Cách phân loại các linh kiện, nguyên tắc làm việc, các loại linh kiện khác nhau được mô tả và so sánh.

Công trình này được thực hiện tại Bộ môn Điện tử - Viễn thông, Khoa Vật lý, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên – ĐHQG Tp. HCM.

I. MỞ ĐẦU

Trong vòng 40 năm qua, máy tính điện tử đang ngày càng mạnh lên, trong khi đó đơn vị nhỏ cơ bản của chúng là các transistor lại đang dần co ngắn lại về kích thước. Tuy nhiên, các định luật trong cơ học lượng tử cộng thêm những giới hạn của vật chất và kĩ thuật chế tạo lại sớm hạn chế sự thu nhỏ nhanh về kích thước của các transistor bán dẫn hiệu ứng khối ngày nay. Các nhà nghiên cứu dự đoán rằng khi kích cỡ toàn bộ một transistor bán dẫn hiệu ứng khối được thu nhỏ đến khoảng 0.1 micrô (tức là 100 nm) hay nhỏ hơn thì các linh kiện này có thể không còn hoạt động nữa.

Vì vậy, để tiếp tục thực hiện tốt quá trình thu nhỏ các vi mạch hiện nay, các mẫu thiết kế linh kiện điện tử nanô sẽ được thay thế bằng những mẫu thiết kế mới dành cho những linh kiện dựa trên hiệu ứng của cơ học lượng tử. Những hiệu ứng này có ảnh hưởng lớn ở dải rất nhỏ là nanômét (1 nm = $1/10^9$ m hay bằng 10 lần đường kính nguyên tử).

Báo cáo này tổng quan về linh kiện hiệu ứng lượng tử, dải nanômét đến dải micrômét.

Chủ đề về các linh kiện điện tử nanô được chia nhỏ ra thành 2 mục chính như sau [1]:

- Linh kiện điện tử nanô hiệu ứng lượng tử bán dẫn.
- Linh kiện điện tử phân tử.

Việc chế tạo các linh kiện hiệu ứng lượng tử và điện tử đơn bán dẫn là cách tiếp cận mà hầu hết các nhóm nghiên cứu linh kiện điện tử nanô chọn lựa [2]. Bất chấp sự mới mẻ của thiết kế, các nhà nghiên cứu có thể phát triển, chế tạo và ứng dụng trong mạch các linh kiện loại mới đầy hứa hẹn nhờ 50 năm kinh nghiệm trong ngành công nghiệp với các chất bán dẫn khối.

Điện tử phân tử là một cách tiếp cận tương đối mới, có thể thay đổi cả nguyên tắc hoạt động lẫn vật liệu được sử dụng trong linh kiện điện tử. Yếu tố làm nên sự thay đổi cơ bản này là các phân tử có cấu trúc thang nanômét tự nhiên. Không giống các cấu trúc nanô xây dựng từ các chất bán dẫn khối, các phân tử này có thể được làm giống nhau, dễ chế tạo và giá thành rẻ, hàng tỷ các phân tử sẽ cần cho việc sản xuất các máy tính có mật độ cực cao. Hai thách thức có ý nghĩa rất lớn được đặt ra: một là, phải sáng chế ra các cấu trúc phân tử hoạt động như chuyển mạch điện; hai là, phải lắp ráp các phân tử này thành các cấu trúc cần cho sự tính toán tin cậy. Những thử thách kể trên kích thích việc nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm theo hướng các mục tiêu này.

II. LINH KIỆN ĐIỆN TỬ NANÔ HIỆU ỨNG LƯỢNG TỬ BÁN DẪN

Các linh kiện này là sự chọn lựa thích hợp để tiếp tục tăng mật độ và tốc độ xử lí thông tin. Công nghệ này làm thay đổi những nguyên tắc hoạt động, nhưng không làm thay đổi môi trường tạo chất bán dẫn cho vi mạch. Các FET trong vi mạch trên thị trường ngày nay có bề ngang xấp xỉ 1 micrô hay 1000 nm và thậm chí những người đề xướng lạc quan nhất về vấn đề thu nhỏ FET hiệu ứng khối tiên đoán rằng: chúng sẽ ngừng hoạt động hiệu quả khi chiều dài cổng của FET hạ xuống dưới mức 25 nm tương ứng với chiều dài của toàn bộ linh kiện xấp xỉ 100 nm.

Trái lại, những linh kiện chuyển mạch dựa trên hiệu ứng lượng tử có xu hướng hoạt động tốt hơn khi chúng được tạo ra với kích thước nhỏ hơn. Các linh kiện điện tử nano hiệu ứng lượng tử bán dẫn có thể được tạo ra có bề ngang chỉ xấp xỉ từ 12 đến 25 nm và vẫn hoạt động hiệu quả nếu chúng được chế tạo cùng kiểu ở dải này. Hiện nay, việc chế tạo hàng loạt ở thang nhỏ này làm nảy sinh một số thách thức đối với các mẫu thiết kế linh kiện.

Tuy nhiên, một số linh kiện chuyển mạch điện tử nano bán dẫn vẫn đang được chế tạo mẫu và những bộ xử lý điện tử nano bán dẫn mẫu đang hoạt động. Hơn nữa, sự giảm mạnh về kích thước có thể xuất phát từ việc giới thiệu trên qui mô rộng về các linh kiện điện tử nano trên. Chính sự thu nhỏ kích thước này có thể tạo ra vi mạch có công suất thấp và tốc độ cực nhanh với 100 tỉ hoặc thậm chí đến 1000 tỉ linh kiện chuyển mạch trên một chip CPU đơn cũng như bộ nhớ với kích thước terabyte trên một chip.

Những tiến bộ vượt bậc như thế đòi hỏi phải chế tạo hàng loạt linh kiện như nhau, độ tin cậy cao, điểm đặc biệt là được chế tạo bằng chất bán dẫn với chiều rộng chỉ từ 5 đến 10 nanômét. Kích thước này ít nhất nhỏ bằng 25 lần kích thước mà phương pháp chọn lựa công nghiệp hiện nay có thể đạt được khi sử dụng kỹ thuật in, khắc bằng tia cực tím. Mục tiêu gần hơn, “khiêm tốn” hơn không đòi hỏi độ chính xác đến như thế, mà là lợi dụng được những tính chất khác ở các linh kiện hiệu ứng lượng tử bán dẫn, thí dụ như sự tiêu thụ công suất thấp và tốc độ cao.

A. Các loại linh kiện điện tử nano bán dẫn

Như được đề cập trong hình 1, có 3 loại linh kiện điện tử nano bán dẫn cơ bản: (1) chấm lượng tử (QD); (2) linh kiện đường hầm cộng hưởng (RTD) và (3) transistor đơn điện tử (SET). Một “đảo” nhỏ được cấu tạo từ chất bán dẫn hoặc kim loại, các electron có thể bị giam giữ trong đó, là đặc điểm cấu trúc chủ yếu mà tất cả những linh kiện điện tử nano bán dẫn này thường có. “Đảo” trong linh kiện điện tử nano chiếm một vai trò tương tự như một kênh hình thành bên dưới cổng trong một transistor hiệu ứng trường vi điện tử quen thuộc. Sự cấu thành, hình dạng, kích thước của “đảo” cho ta những loại linh kiện điện tử nano bán dẫn khác nhau và các đặc tính riêng biệt của chúng. Kiểm soát những yếu tố này cho phép nhà thiết kế linh kiện sử dụng hiệu ứng lượng tử theo nhiều cách khác nhau để điều khiển dòng điện tử vào và ra khỏi “đảo”.

B. Linh kiện đường hầm cộng hưởng

Ở đây, bước đầu ta tập trung giải thích hoạt động của linh kiện đường hầm cộng hưởng, vì các linh kiện này dùng hiệu ứng lượng tử ngay cả ở dạng đơn giản nhất của chúng. Ngày nay, linh kiện trên thường được chế tạo từ những lớp của hai hợp kim bán dẫn hoá trị III/V khác nhau, chẳng hạn cặp GaAs và AlAs. Loại đơn giản nhất của linh kiện đường hầm cộng hưởng là điốt đường hầm cộng hưởng (RTD).

Như mô tả ở hình 3a, điốt đường hầm cộng hưởng được tạo thành bằng cách đặt hai rào cách điện trong chất bán dẫn, hình thành giữa chúng một “đảo” hoặc giếng thế nơi các điện tử có thể tồn tại. Điốt này được tạo thành với “đảo trung tâm” rộng xấp xỉ 10 nanômét. Khi điện tử bị giam giữ giữa hai rào sát nhau đó, cơ học lượng tử giới hạn năng lượng của chúng ở một trong một số hữu hạn các mức lượng tử hoá riêng biệt. Sự lượng tử hoá năng lượng này là nền tảng cho hoạt động của điốt đường hầm cộng hưởng.

Cách duy nhất cho điện tử di xuyên qua linh kiện, nói theo kiểu cơ học lượng tử là “tạo đường hầm” xuyên qua hai lớp rào. Khả năng các điện tử có thể tạo đường hầm lại phụ thuộc vào năng lượng của những điện tử mới vào. Năng lượng này được so sánh với các mức năng lượng trên “đảo” của linh kiện. Như được minh họa trong hình 3b, nếu năng lượng của điện tử mới vào khác với mức năng lượng cho phép bên trong rào thế trên “đảo” thì không có dòng chảy qua. Linh kiện ngưng hoạt động.

Tuy nhiên, khi năng lượng của những điện tử tới thẳng hàng với năng lượng của một trong các mức năng lượng bên trong, như được trình bày ở hình 3c, thì năng lượng của những điện tử bên ngoài giống thế “cộng hưởng” với năng lượng cho phép bên trong giếng thế. Khi đó, có dòng điện qua linh kiện, tức là linh kiện mở.

Bằng cách bổ sung một điện cực cổng nhỏ trên đảo của một RTD ta có thể tạo ra một linh kiện đường hầm cộng hưởng phức tạp hơn một chút gọi là transistor đường hầm cộng hưởng (RTT) (hình 4). Trong cấu hình ba chân này, một điện thế cổng nhỏ có thể kiểm soát dòng lớn qua linh kiện. Vì điện thế tới cổng rất nhỏ có thể dẫn đến việc xuất hiện dòng điện và điện thế tương đối lớn qua linh kiện, sự khuếch đại hay “hệ số khuếch đại” đạt được. Do đó, một RTT có thể thực hiện cả hai vai trò chuyển mạch và khuếch đại như một transistor hiệu ứng khối thông thường.

Không giống như những transistor hiệu ứng khối thông thường chỉ có hai trạng thái chuyển mạch, “mở” và “đóng”, linh kiện đường hầm cộng hưởng như RTD và RTT có thể có một số trạng thái chuyển mạch. Điều này xảy ra vì giếng lượng tử có khả năng thể hiện ra một số mức năng lượng có thể. Do vậy, khi thế thiên áp trên RTD tăng từ zêrô, linh kiện đóng, linh kiện bắt đầu mở khi mức năng lượng đầu tiên cộng hưởng với các điện tử tới. Sau đó, nó đóng trở lại khi thế thiên áp được tăng lên nữa, qua khỏi ngưỡng cộng hưởng. Mặc dù vậy, nếu có một mức năng lượng thứ hai trong giếng lượng tử thì linh kiện có thể mở trở lại khi thế thiên áp của RTD (hoặc thế cổng của một RTT) vẫn được tăng lên. Đặc tính chuyển mạch nhiều trạng thái này cho phép mỗi linh kiện “đếm cao hơn” và biểu diễn nhiều trạng thái logic hơn.

Tính nhiều trạng thái này của RTD được minh họa trong hình 5. Các đỉnh trong hình vẽ tương ứng với sự liên kết của các mức năng lượng trong giếng với phần bị chiếm của vùng dẫn tại cực nguồn. Dòng giảm giữa các đỉnh trên đường cong khi thế bị thay đổi làm cho năng lượng của một mức lượng tử trong giếng thấp hơn vùng dẫn.

Hai đỉnh dòng được trình bày trong hình 5(b) tương ứng, sự cộng hưởng với một trong hai trạng thái năng lượng trong giếng thế chỉ ra trong phần 5(a). Tính chất nhiều trạng thái có thể thu được bằng cách thay đổi thế cổng trong RTT /9, 10/.

Một trong những đặc điểm quan trọng nhất của các linh kiện hiệu ứng lượng tử là chức năng của chúng từ các đặc trưng $I - V$ duy nhất. Do đó, những linh kiện chức năng dựa trên hiệu ứng lượng tử bao gồm RTD, RTT đóng vai trò quan trọng trong các IC tốc độ hết sức cao /13/.

Khi bắt đầu nghiên cứu các SET, liệu SET có làm việc tại nhiệt độ phòng hay không là mối lo lắng lớn. Mặc dù vậy, những báo cáo gần đây về SET làm việc ở nhiệt độ phòng hứa hẹn rằng các SET với tỷ số dòng đóng mở cao tại nhiệt độ phòng sẽ được sản xuất trong tương lai gần. Do đó, vấn đề mà chúng ta quan tâm bây giờ là sử dụng các SET ra sao và lợi ích nào có thể nhận được bằng sử dụng SET. Bằng cách dùng SET thay cho MOSFET trong các sơ đồ logic LSI đã được thực hiện. Kết quả là việc phát triển các mạch sử dụng SET hơn hẳn các mạch CMOS thông thường cả về công suất tiêu thụ lẫn mật độ. Logic SET lập trình /14/ và logic nhiều giá trị /15/ là các thí dụ hấp dẫn về cải tiến chức năng bằng sử dụng SET.

C. Transistor đường hầm cộng hưởng “lai” giữa vi điện tử và điện tử nanô

RTT nanô có khuynh hướng rất khó sản xuất với tính chất giống nhau ở số lượng lớn vì các RTT này có cấu trúc tương đối phức tạp, kích thước nhỏ và độ nhạy rất cao của những hiệu ứng mà chúng sử dụng. Tuy nhiên, cũng có những linh kiện điện tử nanô là “thể lai” của linh kiện hiệu ứng lượng tử bán dẫn được kết hợp với transistor thang micrô. Một linh kiện giống như transistor lai, RTD-FET được cấu trúc bằng cách ghép những RTD hiệu ứng lượng tử nanô nhỏ xíu vào máng (hoặc cực nguồn) của FET thang micrô hiệu ứng khối. Sơ đồ của linh kiện này được trình bày ở hình 6.

RTT lai này có thể có những đặc tính chuyển mạch đa trạng thái của loại được mô tả trong phần trước đối với RTT thuần nanô. Vì lí do này, linh kiện “lai” có thể biểu diễn nhiều trạng thái logic hơn FET vi điện tử thuần hiệu ứng khối. Theo cách đó, mật độ của logic có thể được tăng lên khi sử dụng các đặc trưng chuyển mạch đa trạng thái của RTT điện tử micrô-nanô lai mà không làm tăng đáng kể mật độ của những linh kiện trong một vi mạch. Các RTT lai này cũng có những ưu điểm: công suất thấp và tốc độ cao như RTT thuần điện tử nanô.

Điều quan trọng nhất là việc tạo ra những mạch với loại RTT ba chân lai tương đối lớn này lại dễ dàng hơn việc chế tạo các mạch RTT thuần điện tử nanô với cấu trúc phức tạp, nhỏ hơn nhiều. Vì lí do này mà một số nhóm nghiên cứu đang thử nghiệm những linh kiện nói trên. Vào năm 1998, những

mạch mẫu thử nghiệm thô sơ dựa trên linh kiện lai kể trên đã được trình diễn [2,3]. Logic lai có thể được xem như bước kỹ thuật thực tế quan trọng trên con đường tiến hoá hướng đến điện tử nano. Nó sẽ làm tăng thêm tính ích lợi của các linh kiện hiệu ứng lượng tử trong vi mạch với rất nhiều chức năng.

III. LINH KIỆN ĐIỆN TỬ PHÂN TỬ

Cuối cùng, điều mong muốn nhất là xây dựng được những mạch điện tử nano công suất thấp, mật độ cực cao được tạo ra từ những linh kiện chuyển mạch thuần nano và các dây. Ngành điện tử phân tử sử dụng các phân tử liên kết đồng hoá trị đặc biệt hoạt động như các dây và linh kiện chuyển mạch; điện tử phân tử là chọn lựa trong tương lai xa hơn để đạt được sự tăng lên về mật độ và tiếp tục ứng dụng định luật Moore giảm xuống dải nanômét. Linh kiện chuyển mạch phân tử đặc biệt có thể đạt chiều ngang nhỏ bằng 1,5 nanômét, với mật độ xấp xỉ 10^{12} linh kiện / cm^2 . Việc giảm kích thước này có thể đưa đến những bộ nhớ cỡ Terabyte nằm trên một chip và hơn 1000 tỉ linh kiện chuyển mạch trên một chip CPU đơn. Ưu thế đầu tiên của ngành điện tử phân tử là các phân tử có cấu trúc nano tự nhiên mà chúng có thể được tạo ra hoàn toàn giống hệt nhau với số lượng khổng lồ (xấp xỉ 10^{23}). Ngành hoá hữu cơ tổng hợp - ngành hoá học của hợp chất gốc cacbon cũng cho ta nhiều sự lựa chọn trong thiết kế và chế tạo ra các linh kiện có bản chất nano này hơn là công nghệ có sẵn hiện nay để sản xuất chip bán dẫn với những đặc trưng dải nanômét. Trong những năm 1997 và 1998 người ta chỉ ra rằng, những phân tử hữu cơ nhỏ bé có thể dẫn và điều khiển dòng điện; các phân tử sinh học hữu cơ lớn dẫn điện và phân tử đặc biệt trong công thức phân tử của cacbon mới được khám phá gần đây, gọi là "ống nhanh" có nhiều đặc tính điện hữu ích và rất thú vị [15-21].

Sự tiến bộ vượt bậc trong việc hiểu và khai thác những đặc tính điện của các phân tử hữu cơ đặc biệt. Có sự tiến bộ thực nghiệm đặc biệt trong việc chứng minh rằng các phân tử đặc biệt có thể dẫn điện, hoạt động như là các dây dẫn và rằng chúng cũng có thể đóng vai trò như là những công tắc đóng, mở dòng điện. Chúng ta vẫn chưa sản xuất ra mạch logic sử dụng các linh kiện chuyển mạch phân tử này. Tuy nhiên, những thiết kế cho mạch trên đã được đề xuất vào những năm 1997 và 1998 [15-21].

Ở một chừng mực nào đó, việc nghiên cứu và phát triển các chuyển mạch điện tử bằng phân tử đang được thực hiện trên các linh kiện bán dẫn tương ứng, ngoại trừ ở dải quá nhỏ. Vì vậy, không có gì ngạc nhiên khi những đề xuất về chuyển mạch điện tử phân tử và các mẫu thử nghiệm có thể được phân loại thành: những kiểu tương tự phân tử của điốt bán dẫn và những kiểu tương tự cho FET ba-chân bán dẫn.

Sự tương tự phân tử của RTD được mô tả trong phần II.B và được minh họa ở hình 7. RTD phân tử này được J. Tour chế tạo đầu tiên [12] và sau đó được chứng minh bởi một nhóm các nhà khoa học do M. Reed đứng đầu [13].

Trong cấu trúc phân tử được mô tả ở phần trên cùng của hình 7, thành phần có hình lục giác là các vòng benzen. Chuỗi các vòng benzen này xuất hiện tại đầu bên trái và bên phải của phân tử trong hình 7 thực hiện chức năng như là những "dây phân tử" dẫn điện. Mặt khác các nhóm CH_2 (gọi là nhóm "metylen") đóng vai trò như chất cách điện hoặc "hàng rào" đối với dòng điện tử. Những hàng rào này bẫy các điện tử nằm trên vòng benzen đơn bị lọt vào giữa chúng. Chính điều này đã hình thành nên một "đảo". Cấu trúc giống hình chiếc bánh sandwich phân tử với một đảo ở giữa, sản sinh ra một giếng thế giống như giếng được phác họa ở cuối hình 7.

Ngoại trừ việc nó nhỏ hơn từ 10 đến 100 lần, giếng thế phân tử trong hình 7 rõ ràng rất giống với giếng được minh họa ở hình 3(b) cho RTD bán dẫn. Sự giống nhau này chính là nguyên nhân tại sao phân tử được phác họa trong hình 7 hoạt động như một RTD (điốt đường hầm cộng hưởng).

IV. KẾT LUẬN

Dù có nhiều tiến bộ gần đây trong việc chế tạo và chứng minh về các linh kiện điện tử nano, song những thách thức vẫn còn đó. Đối với ngành điện tử nano bán dẫn, một trong số những thách thức quan trọng nhất là việc có thể tạo ra một cách tin cậy và giống nhau các đặc điểm đặc biệt ở dải

nanômét, chỉ yêu cầu riêng đối với ngành điện tử nanô: đảo, rào, các tiếp xúc khác loại giữa đảo và hàng rào dải nanômét.

Cho đến nay, các linh kiện điện tử nanô bán dẫn phần lớn được chế tạo dưới dạng hợp chất bán dẫn hoá trị III/V như cặp asenit gali và asenit nhôm. Mặc dù vậy, người ta tin rằng ngành điện tử nanô sẽ phải đi một chặng đường dài tới việc cho phép sản xuất hàng loạt các linh kiện điện tử nanô với giá rẻ.

Đối với ngành điện tử phân tử, một trong những thách thức vô cùng lớn chính là việc phát triển các linh kiện hai chân và ba chân hơn là việc chúng có thể được kết hợp chặt chẽ trong mạch. Sau đó, ta phải chứng minh rằng những chuyển mạch phân tử đó có thể được sử dụng để tạo nên trạng thái logic tin cậy như những chuyển mạch phân tử được đề xuất gần đây.

Việc sử dụng cách tiếp cận bằng điện tử phân tử hay bán dẫn, để đáp ứng sự hứa hẹn của ngành điện tử nanô sẽ phải cải tiến rất nhiều cả về kĩ thuật chế tạo lẫn khái niệm về kiến trúc, cho phép lắp ráp các cấu trúc máy tính công suất thấp, nhỏ gọn chứa đến hàng nghìn tỉ linh kiện chuyển mạch điện tử nanô.

OVERVIEW OF NANOELECTRONIC DEVICES

Dinh Sy Hien, Dinh Viet Nga

University of Natural Sciences, Vietnam National University-Ho Chi Minh City

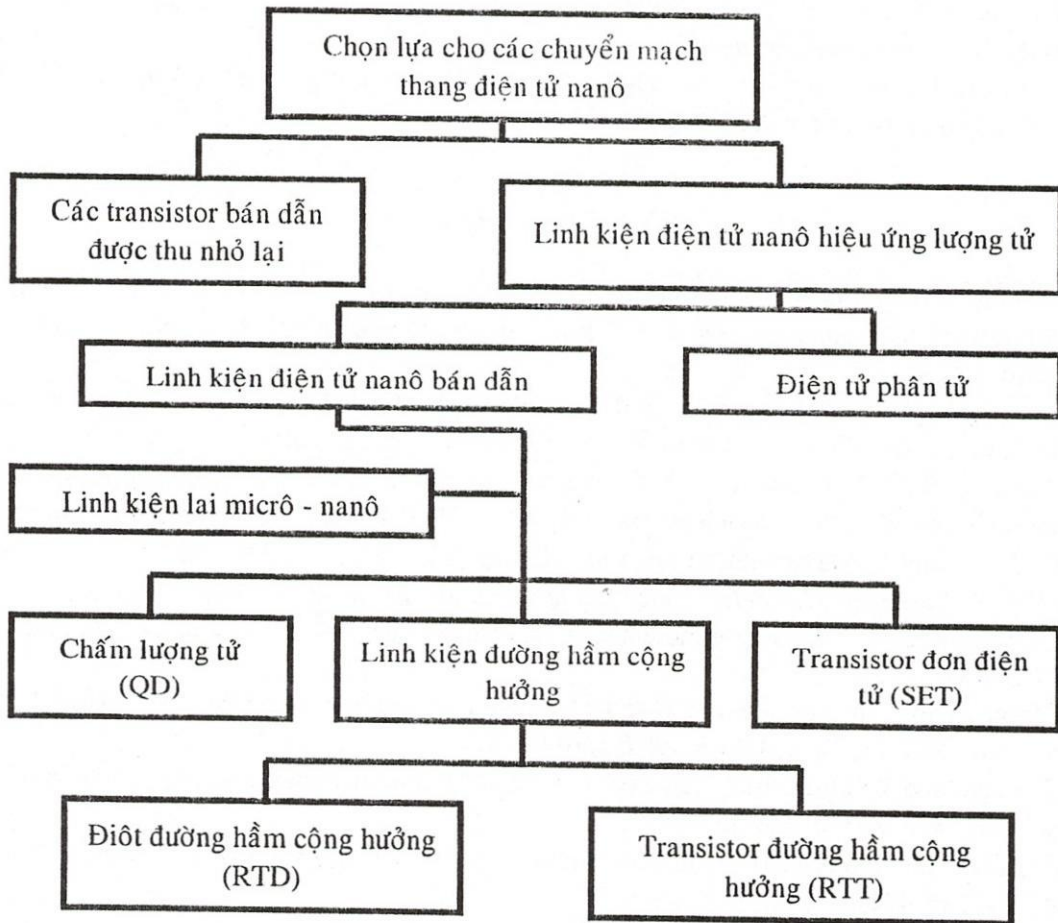
ABSTRACT: *This paper provides an overview of research developments toward nanometer scale electronic switching devices for use in digital circuits. Specifically, two classes of alternatives to the field-effect transistor are considered: (1) quantum-effect and single electron solid-state devices and (2) molecular electronic devices. A taxonomy of devices in each class is provided, operational principles are described and compared for the various types of devices.*

This work has been performed at Department of Electronics & Telecommunications, Faculty of Physics, HCM University of Natural Sciences.

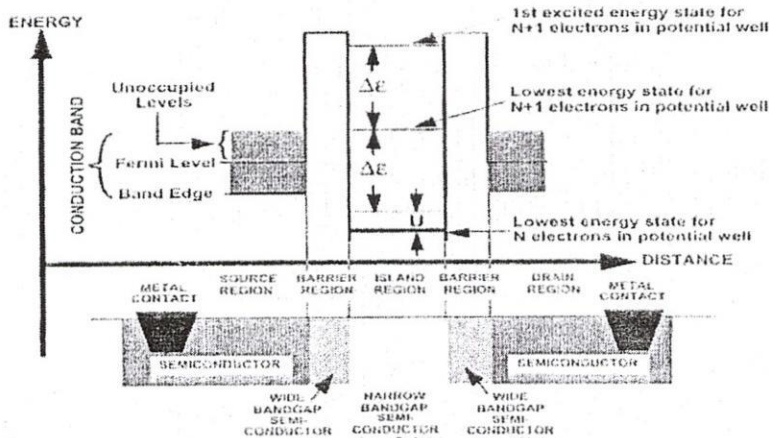
TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. D. Goldhaber-Gordon, M. S. Montermerlo, J. C. Love, G. J. Opiteck, and J. C. Ellenbogen, "Overview of Nanoelectronic Devices," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, No 4, April 1997, p. 521-540.
- [2]. A. C. Seabaugh, J. H. Luscombe, and J. N. Randall, "Quantum Functional Devices: Present Status and Future Prospects," *Future Electron Devices Journal*, Vol. 3, p. 9-20, 1993.
- [3]. B. Brar et al., "High Speed A/A Converters Based on Resonant Tunneling Technology," *Proceeding of the 1998 Government Microelectronics Conference*, Arlington, 13-16 March 1998.
- [4]. S. Kulkarni and P. Mazumder, "Full Adder Circuit using RTDs and MOSFETs," *Proceeding of the 1998 Government Microelectronics Conference*, Arlington, 13-16 March 1998.
- [5]. L. A. Burnm et al., "Are single molecular wires conducting?" *Science*, Vol. 271, 22 March 1998, p. 1705-1707.
- [6]. C. Zhou et al., "Nanoscale metal/self-assembled monolayer/metal heterostructure," *Applied Phys. Lett.*, Vol. 71, No 5, 4 Aug. 1997, p. 611-613.
- [7]. C. Joachim and J. Gimzewski, "An electromechanical amplifier using a single molecule," *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 265, p. 353-357, 1997.
- [8]. S. J. Tans et al., "Individual single wall carbon nanotubes as quantum wires," *Nature*, Vol. 386, 3 April 1997, p. 474.
- [9]. J. W. G. Wildoer et al., "Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes," *Nature*, Vol. 391, 1 January 1998, p. 59.

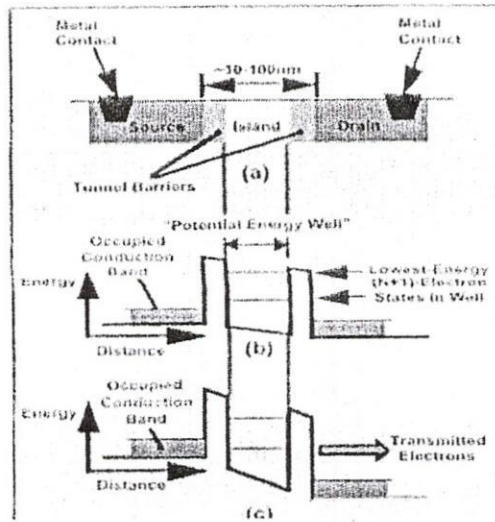
- [10]. F. Capasso and S. Datta, "Quantum Electron Devices," *Physics Today*, p. 189-195, 1990.
- [11]. C. H. Mikkelson et al., "Coupled-Quantum-Well Field-Effect Resonant Tunneling Transistor for Multi-Valued Logic/Memory Applications," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 41, No. 2, p. 132-137, 1994.
- [12]. J. Tour, "Chemical Synthesis of Molecular Electronic Devices," *1997 DARPA ULTRA review conference*, Santa Fe, NM, October 1997.
- [13]. M. Reed, "Self-Assembly-Based Approach to Microelectronic Fabrication and Devices," *1997 DARPA ULTRA review conference*, Santa Fe, NM, October 1997.
- [14]. Rainer Waser, *Nanoelectronics and Information Technology*, Wiley-VCH GmbH & Co KGaA, 422, 2004.
- [15]. K. Uchida, J. Koga, R. Ohba, and A. Toriumi, *Technical Digest of Devices Meeting*, (2000) 863.
- [16]. Y. S. Yu, S. W. Hwang, and D. Ahn, *IEEE trans. Electron Devices*, 46, 1667 (1999).
- [17]. L. A. Burnm et al., "Are single molecular wires conducting?" *Science*, Vol. 271, 22 March 1998, p. 1705-1707.
- [18]. C. Zhou et al., "Nanoscale metal/self-assembled monolayer/metal heterostructure," *Applied Phys. Lett.*, Vol. 71, No 5, 4 Aug. 1997, p. 611-613.
- [19]. C. Joachim and J. Gimzewski, "An electromechanical amplifier using a single molecule," *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 265, p. 353-357, 1997.
- [20]. S. J. Tans et al., "Individual single wall carbon nanotubes as quantum wires," *Nature*, Vol. 386, 3 April 1997, p. 474.
- [21]. J. W. G. Wildoer et al., "Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes," *Nature*, Vol. 391, 1 January 1998, p. 59.



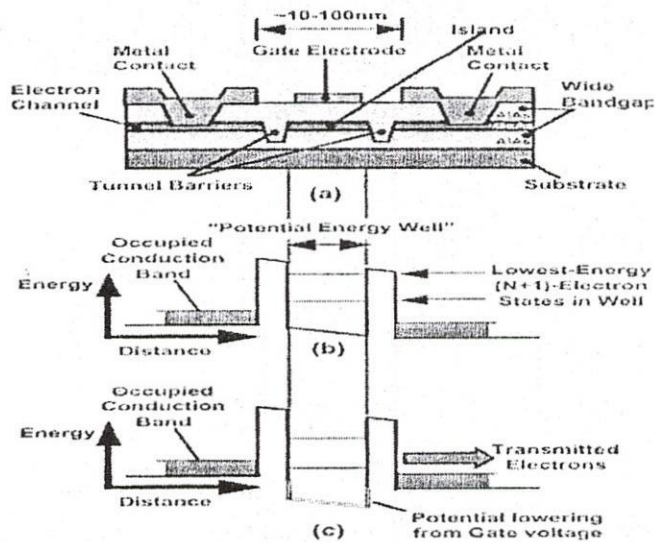
Hình 1. Phân loại linh kiện điện tử nano



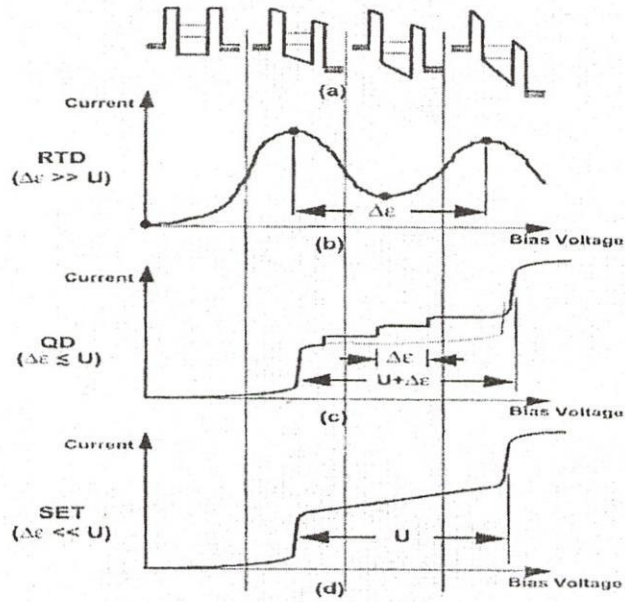
Hình 2. Giếng lượng tử cho một diốt đường hầm lượng tử (RTD): năng lượng nạp U , năng lượng kích thích ΔE



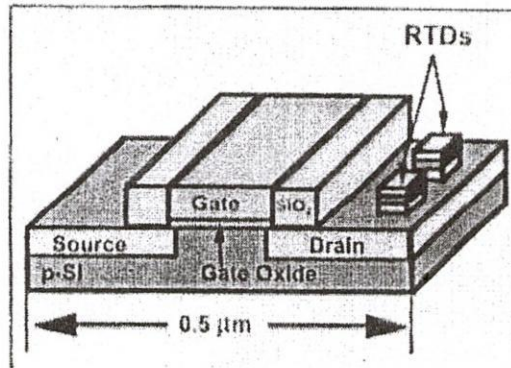
Hình 3. Hoạt động của diốt đường hầm cộng hưởng (RTD): a) tiết diện ngang của RTD; b) giếng thế ngăn điện tích truyền qua linh kiện; c) dòng điện tử có thể truyền qua linh kiện khi tăng thế thiên áp



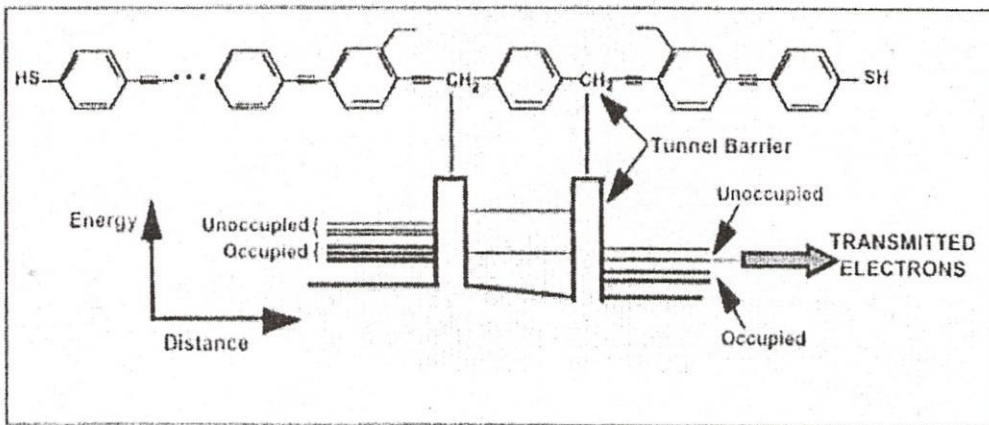
Hình 4. Hoạt động của transistor đường hầm cộng hưởng (RTT): a) tiết diện ngang của linh kiện RTT; b) các rào trong linh kiện tạo nên giếng thế quanh đảo; c) dòng điện tử truyền qua linh kiện do tăng thiên áp cổng



Hình 5. Dòng I đối với thế thiên áp V được vẽ trong ba loại linh kiện điện tử nano: a) sự thay đổi trong giếng lượng tử khi thay đổi thế thiên áp; b) I (V) cho RTD; (c) I(V) cho QD; (d) I(V) cho SET



Hình 6. Transistor đường hầm cộng hưởng điện tử lai micro-nano



Hình 7. Điốt đường hầm cộng hưởng điện tử phân tử