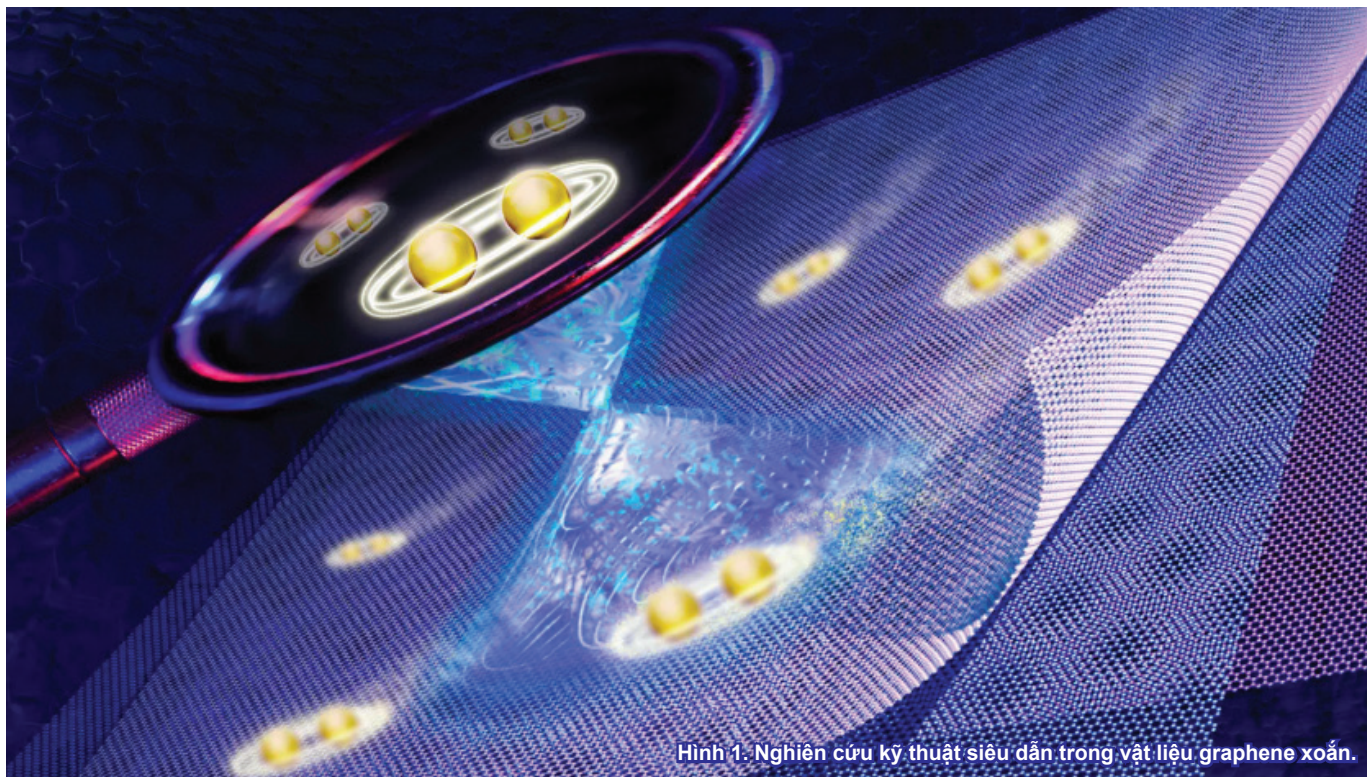




Hình 1: Nghiên cứu kỹ thuật siêu dẫn trong vật liệu graphene xoắn.

Khi graphene “xoắn” tạo ra siêu dẫn: Bước tiến mới của vật lý lượng tử

Trần Minh Tráng, Hoàng Ngọc Sơn, Quách Ngọc Tăng

Trường Cao đẳng Kỹ thuật Thông tin, Bình chủng Thông tin liên lạc

“

Graphene từ lâu đã được biết đến là vật liệu hai chiều có tính chất điện tử đặc biệt. Tuy nhiên, khi các lớp graphene được xoắn với nhau ở một góc nhỏ gọi là “góc ma thuật”, hệ vật liệu này có thể xuất hiện hiện tượng siêu dẫn không thông thường. Những nghiên cứu mới nhất trên graphene ba lớp xoắn (magic-angle twisted trilayer graphene, MATTG) đã cung cấp bằng chứng trực tiếp về trạng thái siêu dẫn đặc biệt này, mở ra triển vọng mới cho vật lý chất rắn và công nghệ lượng tử.

”

Siêu dẫn và bước ngoặt từ graphene xoắn

Siêu dẫn là hiện tượng mà điện trở điện tử biến mất hoàn toàn khi một vật liệu được làm lạnh đến một nhiệt độ tới hạn nhất định. Theo truyền thống, cơ chế này được mô tả bởi lý thuyết BCS (Bardeen - Cooper - Schrieffer Theory), các electron ghép cặp qua tương tác với phonon (sóng mạng tinh thể) để tạo ra trạng thái Cooper pairs. Tuy nhiên, nhiều vật liệu phức tạp như cuprates cho thấy siêu dẫn “không thông thường” (unconventional superconductivity) - mà cơ chế ghép cặp vẫn chưa được hiểu rõ trong khuôn khổ lý thuyết BCS hiện nay.

Năm 2018, nhóm của Pablo Jarillo-Herrero tại Viện Công nghệ Massachusetts (Massachusetts Institute

of Technology - MIT) lần đầu tiên chứng minh rằng, hai lớp graphene xoay lệch với nhau khoảng 1,1 độ (magic angle) có thể trở thành siêu dẫn ở nhiệt độ gần 1,7 độ K, một điều không ngờ tới đối với một vật liệu đơn thuần chỉ gồm carbon. Điều này đã mở ra nhánh nghiên cứu twistrionics - nghiên cứu cách mà việc xoay các lớp trong vật liệu hai chiều làm thay đổi hoàn toàn tính chất điện tử của chúng.

Khi hai lớp graphene được xoay với nhau ở góc magic, cấu trúc vùng năng lượng của electron trong vật liệu bị “phẳng hóa”, tức là dải năng lượng trở nên rất hẹp (flat bands). Các dải năng lượng phẳng làm giảm động năng của electron. Khi đó, tương tác giữa các electron trở thành yếu tố chi phối tính chất vật liệu. Trong bối cảnh này, các electron có thể kết hợp với nhau theo những cách mới, dẫn tới các trạng thái điện tử có tính chất lạ, bao gồm cả siêu dẫn không thông thường, nơi mà năng lượng cần thiết để tách cặp electron khỏi nhau (gọi là superconducting gap) phụ thuộc theo hướng chuyển động của electron và không giống như siêu dẫn thông thường.

Thiết kế vật liệu bằng góc xoắn nguyên tử

Trong các nghiên cứu gần đây, nhóm các nhà khoa học tại MIT đã tập trung vào hệ graphene ba lớp xoắn ở góc ma thuật, một cấu trúc được thiết kế nhằm mở rộng và làm rõ các hiện tượng điện tử đã từng được quan sát trong graphene hai lớp xoắn. Hệ vật liệu này được xây dựng bằng cách xếp chồng ba lớp graphene riêng biệt, trong đó các lớp được xoay lệch nhau với góc gần 1,1 độ - giá trị được gọi là “góc ma thuật”, nơi các hiệu ứng tương quan điện tử trở nên đặc biệt mạnh.

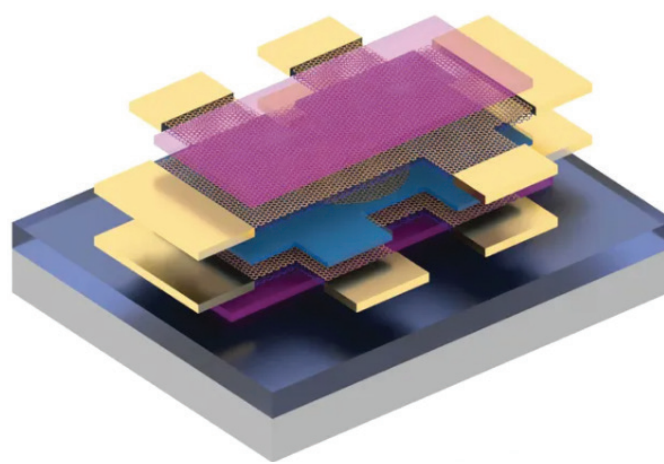
Để khảo sát trực tiếp các tính chất siêu dẫn của hệ graphene ba lớp xoắn, các nhà nghiên cứu đã thiết kế một cấu trúc sandwich tinh vi, trong đó graphene xoắn được kẹp giữa các lớp hexagonal boron nitride - nitride boron lục giác (hBN) mỏng. hBN đóng vai trò là một lớp cách điện chất lượng cao, giúp cách ly hệ graphene khỏi nhiễu môi trường, đồng thời cho phép tạo ra các tiếp xúc điện và điều khiển điện trường một cách chính xác. Cấu trúc này không chỉ đảm bảo độ tinh khiết của mẫu, mà còn cho phép thực hiện các phép đo phổ năng lượng với độ phân giải cao, từ đó “nhìn” trực tiếp vào khe năng lượng siêu dẫn (superconducting gap).

Kết quả đo cho thấy, khe năng lượng siêu dẫn trong graphene ba lớp xoắn không đồng nhất theo mọi hướng trong không gian động lượng. Cụ thể, các

nhà nghiên cứu quan sát được sự tồn tại của các nút (nodes) - những hướng nhất định mà tại đó độ rộng của khe năng lượng giảm xuống gần bằng không. Sự hiện diện của các nút này là đặc trưng điển hình của siêu dẫn không thông thường, trái ngược với siêu dẫn thông thường theo lý thuyết BCS, nơi khe năng lượng thường đẳng hướng và không có nút.

Mặc dù khe năng lượng có cấu trúc dị hướng với các nút, các phép đo vận chuyển điện cho thấy điện trở của hệ graphene ba lớp xoắn vẫn giảm về bằng không dưới nhiệt độ tới hạn, xác nhận rằng hệ thực sự bước vào trạng thái siêu dẫn. Sự kết hợp giữa dòng điện không điện trở và khe năng lượng có nút cho thấy đây là một trạng thái siêu dẫn đặc biệt, trong đó cơ chế ghép cặp electron khác biệt rõ rệt so với các kim loại siêu dẫn truyền thống.

Ý nghĩa quan trọng nhất của việc quan sát các nút trong khe năng lượng nằm ở chỗ: cơ chế electron-phonon có thể không đóng vai trò chi phối nền tảng của lý thuyết BCS. Thay vào đó, kết quả này chỉ ra rằng, trong graphene xoắn, các cặp electron có nhiều khả năng được hình thành thông qua tương tác electron - electron mạnh, vốn trở nên nổi bật do sự xuất hiện của các dải năng lượng phẳng tại góc ma thuật. Trong điều kiện này, electron di chuyển chậm hơn, khiến các tương tác lượng tử trở nên mạnh hơn. Điều này không chỉ củng cố vai trò của graphene xoắn như một hệ mẫu lý tưởng để nghiên cứu siêu dẫn không thông thường, mà còn mở ra khả năng khám phá những dạng đối xứng ghép cặp và cơ chế vật lý mới trong các hệ vật liệu hai chiều được thiết kế có chủ đích.



Hình 2. Cấu trúc graphene xoắn góc ma thuật trong thiết bị thí nghiệm siêu dẫn.

Hướng đi mới cho công nghệ lượng tử

Phát hiện về hiện tượng siêu dẫn trong graphene xoắn không chỉ mang ý nghĩa thực nghiệm đơn thuần, mà còn tạo ra những tác động sâu rộng đối với cả nghiên cứu cơ bản lẫn định hướng công nghệ trong tương lai. Đặc biệt, hệ vật liệu này mở ra một cách tiếp cận mới để nghiên cứu siêu dẫn không thông thường và cung cấp nền tảng cho các ứng dụng lượng tử tiềm năng, dù còn ở giai đoạn sơ khai.

Trước hết, graphene xoắn được xem là một hệ mẫu lý tưởng để nghiên cứu siêu dẫn không thông thường. Khác với các vật liệu siêu dẫn phức tạp như cuprates hay sắt pnictides, vốn có cấu trúc tinh thể nhiều thành phần, pha tạp hóa học và các tương tác cạnh tranh khó kiểm soát, graphene xoắn có thành phần hóa học cực kỳ đơn giản, chỉ gồm các nguyên tử carbon sắp xếp trong mạng hai chiều. Sự “tinh khiết về hóa học” này giúp loại bỏ nhiều yếu tố gây nhiễu, cho phép các nhà nghiên cứu tập trung trực tiếp vào vai trò của tương tác electron - electron và cấu trúc dải năng lượng trong việc hình thành trạng thái siêu dẫn.

Hơn nữa, graphene xoắn có khả năng tinh chỉnh linh hoạt thông qua các tham số thực nghiệm như góc xoắn giữa các lớp, mật độ hạt tải và điện trường ngoài. Việc điều chỉnh góc xoắn gần “góc ma thuật” làm xuất hiện các dải năng lượng phẳng, nơi tương tác electron trở nên chi phối, tạo điều kiện thuận lợi cho các trạng thái điện tử tập thể như siêu dẫn và cách điện tương quan. Chính khả năng kiểm soát cao này biến graphene xoắn thành một “phòng thí nghiệm mô hình” để kiểm nghiệm các lý thuyết về siêu dẫn không thông thường, một trong những bài toán trung tâm nhưng vẫn chưa có lời giải thống nhất trong vật lý chất rắn hiện đại.

Bên cạnh ý nghĩa khoa học cơ bản, graphene xoắn còn mở ra triển vọng ứng dụng công nghệ trong dài hạn. Nếu các cơ chế siêu dẫn quan sát được trong hệ vật liệu này có thể được khai thác và kiểm soát ở nhiệt độ cao hơn, chúng có tiềm năng đóng góp vào sự phát triển của các thiết bị điện tử siêu dẫn, mạch lượng tử và máy tính lượng tử. Các hệ thống này hứa hẹn hoạt động với hiệu suất cao, tổn hao năng lượng thấp và độ ổn định vượt trội so với công nghệ bán dẫn truyền thống.

Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng, siêu dẫn ở nhiệt độ phòng vẫn là một mục tiêu xa vời và graphene xoắn hiện mới chỉ thể hiện tính siêu dẫn ở nhiệt độ rất thấp. Dù vậy, giá trị lớn nhất của hệ vật liệu này nằm ở việc cung cấp một cơ chế mẫu rõ ràng và có thể điều chỉnh, cho phép các nhà khoa học từng bước hiểu sâu hơn bản chất của siêu dẫn không thông thường. Những hiểu biết này, ngay cả khi chưa dẫn trực tiếp đến ứng dụng tức thời, vẫn có thể đóng vai trò nền tảng cho các đột phá công nghệ trong tương lai.

Nghiên cứu về siêu dẫn trong graphene xoắn cho thấy việc điều khiển cấu trúc vật liệu ở cấp độ nguyên tử có thể tạo ra những trạng thái điện tử hoàn toàn mới. Các kết quả thực nghiệm trên graphene ba lớp xoắn đã cung cấp bằng chứng rõ ràng về siêu dẫn không thông thường, vượt ra ngoài khuôn khổ lý thuyết BCS truyền thống.

Điều này mở ra hướng tiếp cận mới trong thiết kế vật liệu lượng tử, nơi hình học cấu trúc đóng vai trò quyết định đối với tính chất vật lý. Trong dài hạn, những hiểu biết này có thể đặt nền móng cho các công nghệ điện tử siêu dẫn và máy tính lượng tử thế hệ mới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Y. Cao, V. Fatemi, S. Fang, et al. (2018), “Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices”, *Nature*, **556**(7699), pp.43-50.
2. J.M. Park, Y. Cao, K. Watanabe, et al. (2021), “Flavour Hund’s coupling, Chern gaps, and charge diffusivity in moiré graphene”, *Nature*, **590**(7844), pp.249-255.
3. H. Polshyn, J. Zhu, M.A. Kumar, et al. (2022), “Evidence for unconventional superconductivity in twisted trilayer graphene”, *Nature Physics*, **18**, pp.42-47.
4. J.I.A. Li, T. Taniguchi, K. Watanabe, et al. (2019), “Pairing symmetry in twisted bilayer graphene”, *Nature Physics*, **15**, pp.898-903.
5. P. Jarillo-Herrero, J. Kang, B.A. Bernevig (2020), “Twistronics: Manipulating the electronic properties of layered materials through twist angle”, *Nature Reviews Physics*, **2**, pp.371-386.