同時発表：
筑波研究学園都市記者会（資料配付）
文部科学記者会（資料配付）
科学記者会（資料配付）

二重ナノリングの作製に世界で初めて成功

－量子コンピュータ分野の新技術開拓へ道－

平成１７年2月１４日
独立行政法人物質・材料研究機構

概要

１．独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：岸　輝雄）、ナノマテリアル研究所（所長：青野　正和）のナノデバイスグループ小口　信行ディレクター、間野　高明研究員およびナノ物性グループ黒田　隆主任研究員、迫田　和彰主席研究員らは、量子コンピュータに適用可能な新しいタイプの量子ドットである２重ナノリング構造を作製することに世界で初めて成功した。

２．現状のコンピュータは、複数内蔵されているトランジスタ１つにつき情報を０か１に分解し、トランジスタ内部のスイッチをそれぞれの状態にして計算するという二進法で解答を導き出す仕組みになっているため、大きな数字の素因数分解などを行う際には甚大な時間がかかる。一方、量子コンピュータでは任意の割合で重ね合わせた「０」と「１」の状態を利用するため、複数の計算（超並列計算）を同時に行う事ができ、そのスピードは通常のコンピュータで１００年以上かかる計算が瞬時に行え、既存のコンピュータ概念を覆す可能性がある。

３．量子コンピュータの仕組みとして、量子ドット同士をその内部にある電子が相互作用する程度に近接配置させる必要があるが、超微細加工などによりナノの精度で配置を制御することが困難であり、現実的では無かった。また、自然に配置させる手法も考え出されているが、再現性に問題があった。

４．今回開発した手法では簡易に二つのナノリングを近接配置することができ、またそれぞれが独立した量子ドットとして動作することも確認した。また、二つのリング型量子ドット相互の距離も自由に制御することが可能であり、この成果により量子コンピュータ実現への研究が大きく進むものと期待される。

５．本成果は特許出願済みであり、米科学誌NANO LETTERSに近日掲載予定である。

研究の背景

現代の情報化社会は，高度に発達した半導体エレクトロニクス技術と光ファイバなどによる情報通信技術に支えられている。しかし，近い将来に集積回路（LSI）の集積度が頭打ちになると予測され、コンピュータの進歩に限界の来ることが懸念されている。また、個人情報の保護やネットバンキングの安全性確保などの観点から、情報通信の安全性の向上は今後ますます重要になる。これらの課題の解決を目指して量子コンピュータ[1)]と量子暗号通信[2)]が提案され，実現に向けた技術開発が各国で続いている。

現在のコンピュータは、情報をビットと呼ばれる０か１に分解し、二進法で計算を行う。一方、量子コンピュータでは量子ビット[3)]がそれに代わって計算に使われる。これは０，１のような二つの状態だけでなく，その中間の状態（これを重ねあわせという）を計算に使うために、いわばアナログ的な計算ができる。実際の論理演算は複数の量子ビットの量子力学的な絡み合いを利用し、無数の重ね合わせ状態から一つの状態を決定するため超並列計算とも呼ばれている。したがって逐次的な計算を行う現在のコンピュータに比べ計算速度が飛躍的に向上する。このような量子力学の原理を半導体により実現するためには量子ビットを構成する量子ドット[4)]の寸法が電子の波長程度で、さらに複数の量子ビット間の距離も量子力学的相関が発生する程度の大きさである必要がある。しかし、隣接する２つの量子ドットについて相互作用を制御するためには、主に「自己形成手法」及び「ナノ加工技術（精密な配列制御）」という２手法が存在するが、どちらにも大きな問題があり、その相互作用を制御することによる量子コンピュータの原理実証にはいまだ誰も成功していない。

成果の内容

当機構では、半導体の自己形成手法によるナノ構造作製を世界に先駆けて提案し、これまで研究を進めてきた。今回その手法に改良を加え、半球状の液体金属の微粒子（液滴）に他の元素を照射するだけで、複雑な形状の二重ナノリングを小サイズかつ高品質に形成することに成功した。

本研究は、「液滴エピタキシー法」[5)]とよばれる、日本独自の自己形成手法を用いて行った（図１）。実験には、汎用の分子線エピタキシー装置[6)]を用いた。今回、液滴エピタキシー法に於いて、新たに結晶化条件を厳密に制御することにより、ガリウム原子とヒ素原子の基板表面における拡散と結晶化の特性を生かし、一つの半球状の液滴を二重ナノリングへ結晶化させた。

従来は、非常に強度の強いヒ素分子線を液滴に供給し、瞬間的に結晶化させることにより、ドット型のナノ結晶を成長させていた。今回は、比較的弱いヒ素分子線を供給することにより、液滴からのガリウム原子の拡散を促進した。その流れ出したガリウム原子は、供給されるヒ素原子の強度とのバランスにより、主に液滴の縁の部分とその外側の二カ所で結晶化し、二重ナノリングを形成した。図２及び図３に形成した

二重リング構造の顕微鏡像を示す。円対称性に優れた二重ナノリングが形成していることが観察される。このように、ガリウム液滴にヒ素を照射するという非常に単純な過程で、半球状の一つの液滴から、二つのナノリング構造を自動的に実現した。さらに、リング形成機構は、ガリウム原子の流れ出しに依存しており、その制御により、内側及び外側それぞれのナノリングの半径及び高さはそれぞれ独立に制御可能であることが確認された。

二重ナノリングの電子準位を決定するために、一つの二重ナノリングからの発光特性の観測を行い、それを理論解析の結果と比較した。その結果、二つのリング各々に局在した電子状態があることが理論的に予測され、実際にそれに対応する二つの発光を観測することに成功した。これは、内側及び外側のリングがそれぞれ独立した量子ドットとして機能していることを示唆している。

波及効果と今後の展開

今回開発した二重ナノリングは２つの量子ドットと考えられ、それ一つで量子力学的相関のある２量子ビットとすることができる。さらに、作製条件を選ぶことで外側と内側の２つの量子リング同士の距離を制御することが可能であることから、相互作用の制御に道を開くと考えられる。今後の検討ではそのような相互作用制御が実際に可能であることを検証し、さらにレーザーパルスを利用した量子計算の原理実証に向けて研究を進める予定であり、量子コンピュータ実現へ大きく道を拓くものと思われる。

用語解説

１）量子コンピュータ

量子力学の原理に基づく一種の並列計算方式を用いた次世代の計算機。従来のパソコンはすべての情報が０または１に割り振られていたのに対して、量子状態はその重ね合わせができるため、並列計算が可能となり、現在のコンピュータ何億台もの処理を一度に実行することができる。例えば、暗号の鍵として使われる、大きな数の素因数分解などの計算を短時間で行うことができる。

２）量子暗号通信

１個の光子（フォトン）を情報の最小単位（量子ビット）とする光通信方式。情報が第３者に傍受された場合にはそれを検知できるので、盗聴は不可能であり、現行の暗号通信方式よりも格段に安全性が高い。

３）量子ビット

量子力学の波動関数の原理にしたがって，０状態と１状態を任意の割合で混合した重ね合わせ状態。その実現には核スピン，電子スピン，フォトンなどが用いられる。

４）量子ドット
半導体などで作られたナノ粒子（直径数十ナノメートル程度）のことで、電子やホールを３次元的に閉じ込めることができる。量子ドットの中では閉じ込め効果により電子の運動が量子化されるため、離散化したエネルギー準位が形成される。それにより優れた光学特性や電気特性をもち，半導体レーザーなどの光デバイスの開発へ向けた研究が進んでいる。

５）液滴エピタキシー法
当機構が、世界に先駆けて１９９０年に提案した日本独自の自己形成による半導体ナノ構造作製法。化合物半導体の結晶成長時に、一方の構成元素のみを照射した際に形成される半球状の液体金属微粒子にもう一方の構成元素を照射することにより化合物半導体へと結晶化させ、３次元的なナノ構造を作製する。

６）分子線エピタキシー
超高真空中で、複数の蒸発源から分子（原子）線を発生させて、加熱して清浄化された結晶基板上にエピタキシャル成長をさせるものである。

問い合わせ先：
〒305-0047　茨城県つくば市千現１－２－１
独立行政法人物質・材料研究機構
広報室　TEL:029-859-2026

研究内容に関すること：
独立行政法人物質・材料研究機構
ナノマテリアル研究所　ナノデバイスグループ
ディレクター　小口　信行
TEL：029-859-2700、FAX：029-859-2701

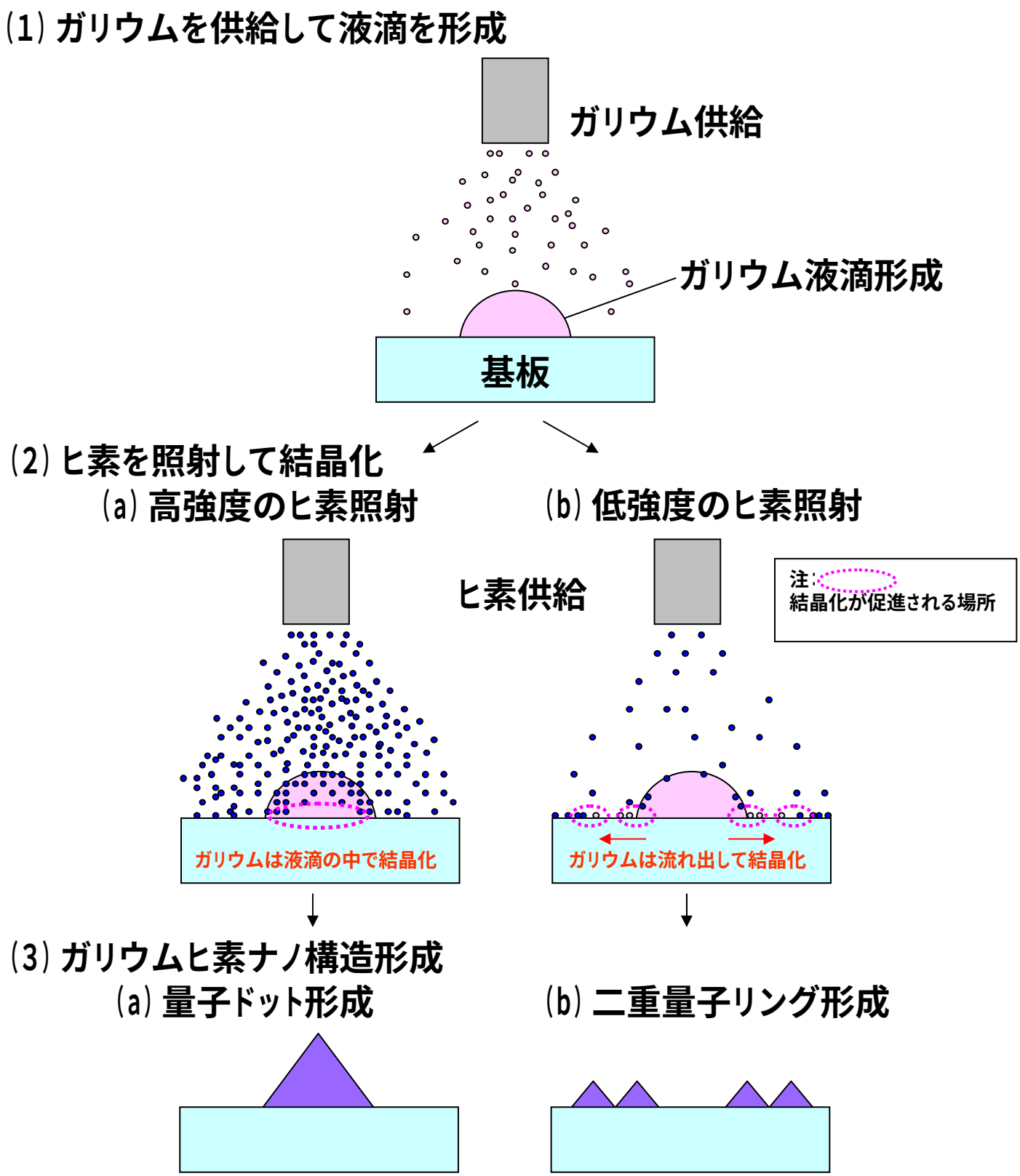

図1　液滴エピタキシー法によるガリウムヒ素ナノ構造の自己形成.
(1) ガリウムのみを供給し、ナノサイズの液滴が形成する
(2) ヒ素を供給し、結晶化する。(a) 従来の方法、(b) 今回の方法
従来は、高強度のヒ素照射により、液滴からのガリウム原子の流れ出しを完全に抑制していたが、今回低強度のヒ素を照射することにより、ガリウム原子が適度に流れ出し、主に液滴の縁及び外側で供給したヒ素原子と結合して、二重のリングが形成された。

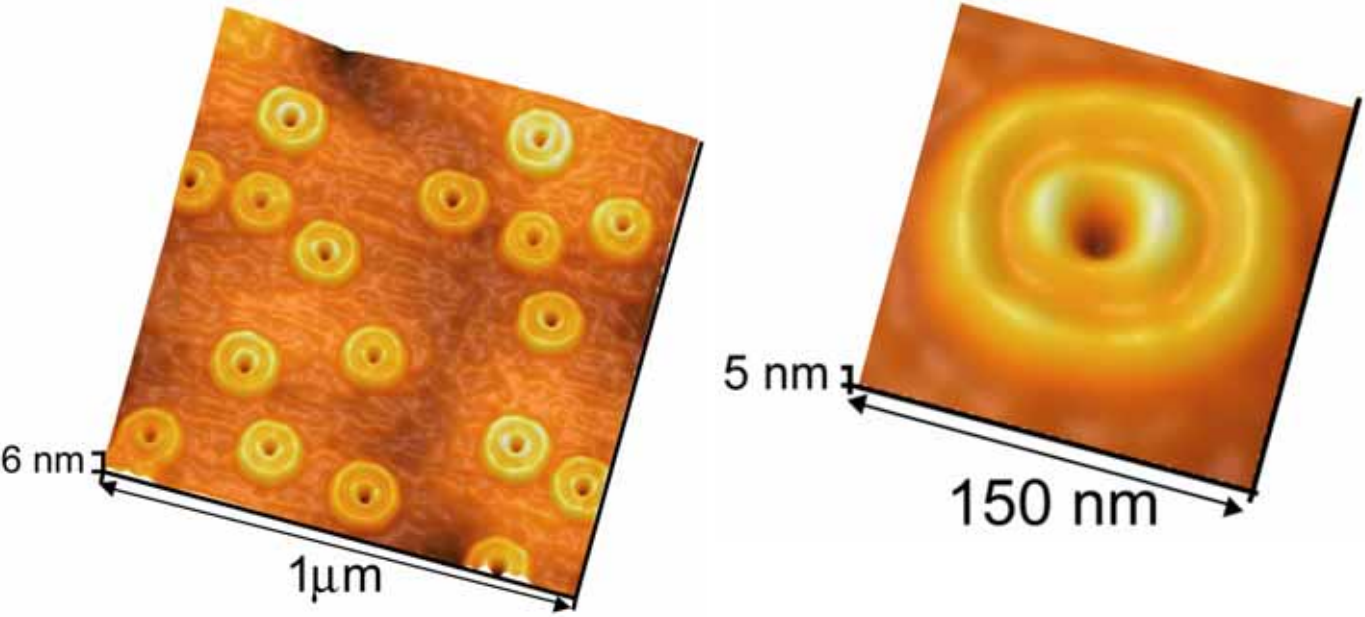

図2　二重ナノリングの原子間力顕微鏡像.
右図は左図の拡大図.
非常にきれいな二重ナノリングの形成が観察される.

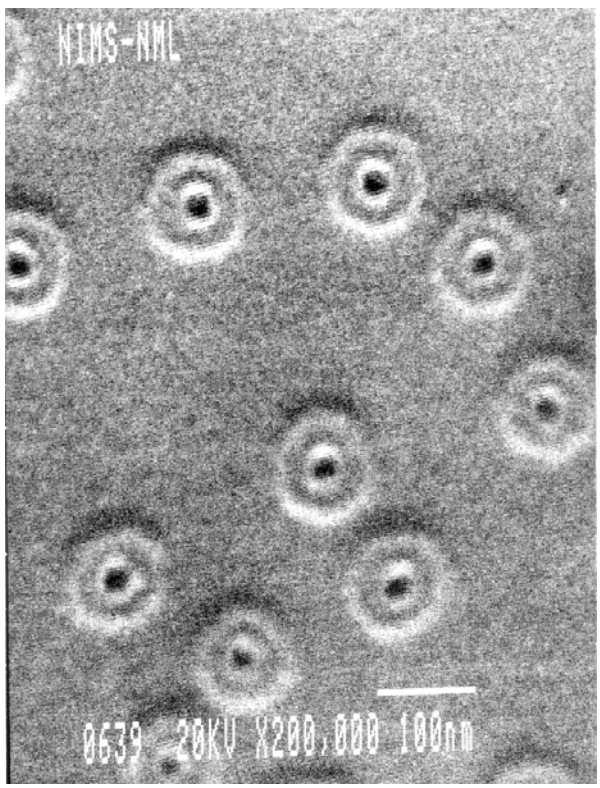

図3　二重ナノリングの高分解能走査型電子顕微鏡像.