



NAGOYA UNIVERSITY Aalto University

国立大学法人名古屋大学
フィンランド・アールト大学

世界で初めてカーボンナノチューブのみで集積回路を実現 - 透明で任意の立体形状に熱成型可能な電子デバイス -

名古屋大学の^(注1)大野雄高准教授らとフィンランド・アールト大学のエスコ・カウピネン教授らは、カーボンナノチューブのみでトランジスタや配線を構成した“全カーボン集積回路”を世界で初めて実現しました。1,000 cm²/Vs を超える移動度が得られ、高性能で透明なフレキシブルデバイスへの応用が期待されます。さらに、実現した全カーボン集積回路は任意の立体形状に熱成型することも可能です。本研究の成果は、プラスチック製品への電子デバイスの融合を可能とし、デザイン性と機能性を併せ持つプラスチック電子デバイスの創出に繋がります。

なお、本件は、8月6日付の英国の科学雑誌ネイチャー・コミュニケーションズ誌^(注2)（電子版）に掲載されました。なお、本論文はオープンアクセスであり、自由にダウンロード可能です。

また、本研究は、日本学術振興会 科学研究費補助金 若手(A)、科学技術振興機構 先端的低炭素化技術開発、アールト大学 MIDE の助成を受けて行われたものです。

(注1) フィンランド・アールト大学客員教授を併任

(注2) <http://www.nature.com/ncomms/2013/130806/ncomms3302/full/ncomms3302.html>

1. 背景

プラスチック材料は加熱すると軟化し、自在な形状に成型することできるため、プラスチック製品は日用品や子供のおもちゃ、電化製品の筐体、医療器具など、多岐にわたって用いられています。一方、電化製品の主要部品である集積回路は硬く脆いシリコンウェハ上に形成され、プラスチック製品との融合は限られていました。

近年、本研究グループではカーボンナノチューブを用いた集積回路の研究を推進し、これまでに透明なプラスチック上に高性能なカーボンナノチューブ薄膜トランジスタやそれを用いた集積回路を初めて実現するなどの成果を挙げてきました[1]。より高い柔軟性や伸縮性を実現するため、配線材料や絶縁膜材料の探索を進めてきました。今回、電極・配線材料にもカーボンナノチューブ薄膜を用い、また絶縁膜材料にアクリル樹脂を用いることにより、極めて柔軟で透明な全カーボン集積回路を実現しました。さらに、全カーボン集積回路が立体形状に熱成型可能であることを示しました。

2. 成果の特徴

(1) 全カーボン集積回路を実現

近年、有機材料やカーボンナノチューブを半導体層に用いた柔軟性をもつフレキシブルデバイスの研究が盛んに行われており、湾曲可能なディスプレイなどが開発されつつあります。より柔軟で究極的には伸縮も可能な電子デバイスの実現には、半導体層のみならず、電極・配線材料や絶縁材料についても伸縮性を持たせることが不可欠ですが、従来から用いられている金属膜や酸化膜などの無機材料は伸縮性を持ちません。本研究では、電極や配線についてもカーボンナノチューブ薄膜により形成するとともに、絶縁材料についても従来の酸化膜に代えてアクリル樹脂を用いることにより、透明で極めて柔軟な全カーボン集積回路を実現しました(図1)。今回、実現した集積回路はリング発振器*¹ や各種論理ゲート、メモリ(SRAM)*² が含まれています。なお、660 nm という厚いアクリル樹脂をゲート絶縁膜に用いているにもかかわらず、ナノ構造への電界集中効果*³ を利用し、5 V という低電圧での集積回路の動作を実現しています。

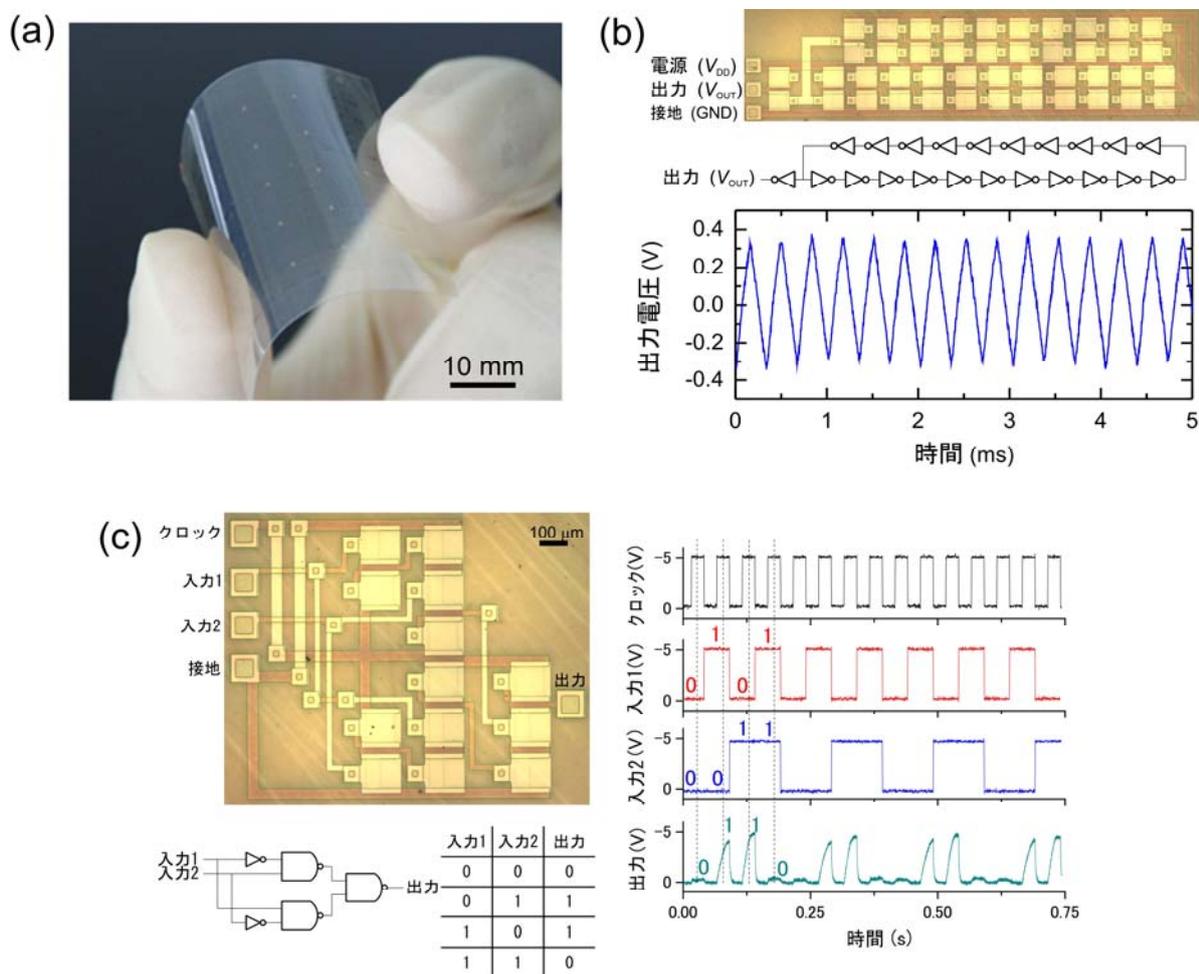


図1 全カーボン集積回路. (a) 写真, (b) リング発振器, (c) 排他的論理和 (Ex-OR).

(2) 1,000 cm^2/Vs を超える高い移動度を実現

従来、プラスチック上に作製される薄膜トランジスタの移動度は $0.01 \sim 50 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 程度でした。以前、本研究グループでは、長尺かつ清浄なカーボンナノチューブ薄膜をプラスチック上に形成する技術を開発し、 $600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える移動度の薄膜トランジスタを実現しています[1]。今回、カーボンナノチューブ薄膜の成膜技術について最適化を進め、移動度 $1,027 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を実現しました。この移動度は単結晶 Si を用いた MOSFET より高く、プラスチック基板上の薄膜トランジスタとしては驚異的な値です。

(3) 任意の立体形状に熱成型可能

実現した全カーボン集積回路において用いられた材料はカーボンナノチューブ薄膜またはプラスチックであり、柔軟性に加えて、極めて高い伸張性を持ち、さらに、熱成型技術により任意の形状に成型することも可能です。今回はその実証例として、ドーム形状に熱成型し、薄膜トランジスタや集積回路の動作を確認しました(図2)。ドーム形状に成型した場合、トランジスタや配線は2軸方向に伸張されますが、CNT 薄膜に亀裂や剥離などの問題生じませんでした。今回の全カーボン薄膜トランジスタの場合、2軸方向に 18%の伸張が施された場合においても正常に動作しました。集積回路においても 7.2%の伸張まで正常動作を確認しました。

本研究で実現した全カーボン集積回路のように、電子デバイスに熱成型を施すことができると、プラスチック製品に電子的機能を容易に実装でき、また、電子デバイスのデザイン性を広げることも可能です。

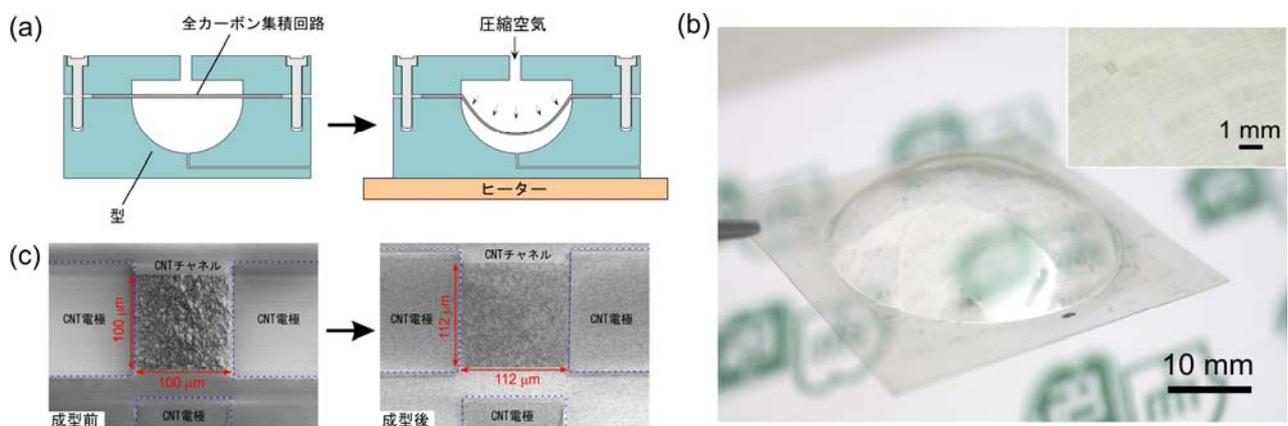


図2 全カーボン集積回路の熱成型. (a) 熱成型工程, (b) ドーム形状に成型された全カーボン集積回路, (c) 成型によるカーボンナノチューブ TFT の構造変化(2軸に 12%伸張).

参考文献:

[1] D.-M. Sun, M. Y. Timmermans, Y. Tian, A. G. Nasibulin, E. I. Kauppinen, S. Kishimoto, T. Mizutani, and Y. Ohno, "Flexible high-performance carbon nanotube integrated circuits", Nature Nanotechnol. 6, 156-161 (2011).

〔用語解説〕

*1 リング発振器:

インバータをリング状に接続した発振回路。内蔵タイマーのクロックや回路全体の基準クロックとして使用される。また、発振周波数は、インバータの遅延時間とインバータの数により決まるため、インバータの動作速度を評価するためにしばしば用いられる。

*2 SRAM(static random access memory): フリップフロップ等の順序回路を用いてデータを記憶するランダムアクセスメモリであり、現在の計算機に必須の基本回路である。定期的なリフレッシュ(記憶保持動作)が不要である。高速で消費電力が低い。

*3 電界集中効果: 電界は微細構造や先鋭構造に集中しやすい。電界放出型の電子源などで利用される現象である。