

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00243

研究課題名（和文）カーボンナノチューブに基づく伸縮性をもつアナログ集積回路の基盤的研究

研究課題名（英文）Scientific research on carbon nanotube-based analog integrated circuits with stretching ability

研究代表者

大野 雄高 (Yutaka, Ohno)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：10324451

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、柔軟なウェアラブルセンサデバイス実現のために必須のアナログ集積回路の実現を目指し、CNTアナログ集積回路の設計・プロセスの学理と技術基盤の構築を行った。特に、CNTデバイスの最も困難課題であった特性ばらつきや不安定性の課題について、デバイス技術のみならず回路設計技術の両面から取り組み、A/D変換器を集積したアナログフロントエンド回路などのデジタル/アナログ混載回路の実現まで至るなど、当初予定以上の成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、センシングデバイスにおいて必須のアナログフロントエンド等のアナログ集積回路を柔軟なフィルム上にCNTと用いて初めて実現したものであり、柔軟なウェアラブルセンサの実現に繋がる重要な成果である。その過程において構築したCNT集積回路設計手法はCNTのみならず他のナノ半導体材料においても有効であり、学術的にも応用上も高い意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to realize analog integrated circuits, which are indispensable for realizing flexible wearable sensor devices, and established the academic and technological basis for the design and process of CNT analog integrated circuits. In particular, we tackled the most difficult issues of CNT devices, such as characteristic variation and instability, from the viewpoints of both device technology and circuit design technology, and achieved results beyond our initial plans, including the realization of mixed digital/analog circuits such as an analog front-end circuit with an integrated A/D converter.

研究分野：ナノ材料エレクトロニクス

キーワード：フレキシブルデバイス アナログ集積回路 カーボンナノチューブ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、センサネットワークを構築することにより多種・多様な情報を収集し、その分析から有用な情報を得るいわゆる IoT が実現されつつある。人の IoT 化についても、スマートウォッチなどのウェアラブルデバイスの普及に伴い、実現しつつあるが、現状のセンシング機能は心拍計測などに限られている。柔軟性や伸縮性を持つ電子デバイスを用いて、人体に直接接着することが可能なウェアラブルセンサデバイスを実現しようとする研究が盛んになっている。例えば、接着型のセンサデバイスに、多種のイオンセンサやグルコースセンサ、乳酸センサなどを集積することにより、汗から詳細な生体モニタリングが可能となる。

生体モニタリングにおいては、種々のセンサに加えて、得られた生体信号を増幅・処理するためのアナログ増幅回路やアナログ/デジタル(A/D)変換器、外部との通信を実現するための高周波回路等を、高い伸縮性をもつフィルム上に、モノリシックに集積する必要がある。特に、外部ノイズの混入を避けるため、センサのごく近傍に増幅回路と A/D 変換器を設置する必要があり、十分な電気的性能と機械的な柔軟性をもってこれらの機能回路を実現することが重要である。

最近、センサや簡単な増幅回路については、有機半導体などを用いて柔軟なデバイスが実現されているものの、その後段のアナログ・デジタル変換器や無線通信を行う高周波回路に今なおついでには、高いキャリア移動度が求められる。これを実現する材料として半導体カーボンナノチューブ(CNT)が挙げられる。これまでに極めて高い柔軟性と高移動度(>1,000 cm²/Vs)を併せ持つ CNT 薄膜トランジスタ(TFT)が実現されている。また、最近、CNT 材料の分離・精製技術の進展がめざましく、クロマトグラフィなどの簡便な手法により、単一の構造の CNT を高純度(99.99%以上)に分離・抽出する技術が確立されつつある。これにより、CNT の半導体応用の研究が米国や中国を中心に急速に活発になってきている。高い性能と形状の柔軟性を兼ね備えた半導体 CNT を用いれば、優れたウェアラビリティと機能性をもつウェアラブルセンサデバイスを実現できる可能性がある。

一方で、半導体 CNT を用いてロジック集積回路については実証が進んでいるものの、アナログ集積回路については、主に設計の難しさから実現に至っていない。特に、センサ信号の増幅に必要な差動増幅回路や演算増幅器などのアナログ回路、アナログ・デジタル変換器などに必須のデジタル・アナログ混載回路は実現されておらず、ウェアラブルセンサデバイスを実現するための基盤的な学理・技術の構築が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、ウェアラブルセンサデバイス実現のために必須のアナログ集積回路の実現を目指し、CNT アナログ集積回路の設計・プロセスの学理と技術基盤の構築を目的とした。特に、CNT TFT の特性ばらつきを含めた精密デバイスモデルを構築し、CNT アナログ集積回路の設計指針を明らかにし、その可能性を明らかにすること、さらに、ウェアラブルデバイス応用を視野に入れ、新たに局所歪み制御という独創的なアイデアを導入することにより、動的な表面にも設置可能な伸縮する CNT 集積回路を実現することを目指した。

3. 研究の方法

前半では、CNT 集積回路設計基盤の構築や素子プロセス技術の構築に主眼を置き、CNT TFT の精密素子モデルおよび集積回路設計ツールの構築を進め、それを用いて素子ばらつき耐性をもつアナログ集積回路設計手法を考案した。また、アナログ回路をセンサに应用する場合、素子の安定性の向上も重要な課題であり、低周波ノイズなどの絶縁膜界面の影響も解析を行った。ウェアラブルセンシングデバイスの実現に向け、伸縮可能な集積回路を実現するための局所歪み制御技術を構築した。後半は、構築した CNT 集積回路設計技術を用いて、演算増幅器、A/D 変換器やセンサデバイスにおいて必須となるアナログフロントエンド回路を設計・試作し、その特性評価から考案した回路設計手法の有効性の実証を進めた。

4. 研究成果

・CNT TFT の精密素子モデルおよび CNT 集積回路設計ツールの構築

回路シミュレーションに必須の素子モデルを実デバイスの電気的特性の詳細な評価に基づいて構築した。実デバイスの静特性から、各種素子パラメータ(移動度、しきい値、s 値、ゲート容量)を抽出し、MOSFET モデルに適用した。CNT TFT に対して MOSFET のモデルが適切か、当初は不明であったが、サブスレッショルド領域とオン領域をなめらかに接続する関数などを導入するなどの修正で可能であった。また、素子ごとの特性のばらつきについても、実デバイスの測定に基づいてモデル化し、素子特性ばらつきが回路特性に及ぼす影響も解析することも可能とした。

・ばらつき耐性をもつ CNT アナログ集積回路設計指針の考案

CNT TFT のばらつきに対して耐性のある集積回路を設計するための手法を検討し、次のような

設計手順を確立した。(1) まず、平均的なデバイスパラメータを持つ素子を用いて基本的な回路を構成し、回路シミュレータを用いながら、素子サイズ(電流量)やバイアス点の設計を行う。

(2) 次に、モンテカルロシミュレーションにより、素子ばらつきが差動増幅回路の特性の及ぼす影響を調べ、素子ばらつき耐性を明らかにする。(3) 素子ばらつきの影響が顕著な場合は、回路特性に支配的な素子のサイズを大きくして素子自体のばらつきを抑制する。(4) バイアス点の安定性を優先し、負荷インピーダンスを低減する。目標のばらつきが得られるまで、これらの手順を繰り返す。

上記の設計指針に従ってばらつき耐性のある回路構成を探索し、差動増幅器において2つのトランジスタと1つのキャパシタで構成される負荷を導入し、直流バイアス点の安定化を図りつつ、交流信号に対して大きな利得の得られる回路構成を明らかにした。特に、負荷インピーダンスを調整し、増幅率を最大化する機構を考案し、特許出願を行なっている。なお、この回路構成については等価回路解析から、理論的にもばらつき耐性の高い回路構成であることを明らかにした。

・局所歪み制御による伸縮可能な集積回路の創出

人間の肌や臓器に直接貼り付けが可能なウェアラブルデバイスの実現には、デバイスに対して25%の伸縮性が求められる。本研究では、これまでに伸縮性をもつことを確認したオールCNT集積回路において、チャネル領域に局所歪み制御層を設置するとともに、high-k ゲート絶縁膜を導入することにより、低電圧動作と歪みに対する安定性を同時に有する伸縮可能な集積回路を実現した。具体的には図1に示すように、伸縮可能なPDMS フィルム上にCNT TFT を作製するプロセスを開発するとともに、高いヤング率をもつ Parylene-C を歪み制御層としてチャネル領域に設置し、歪制御を実現した。TFT のしきい値は0.7V、飽和電圧は-1 Vであり、低電圧動作性を確認した。35%までの外部歪みに対してオン電流は変化せず、優れた安定性を示した。

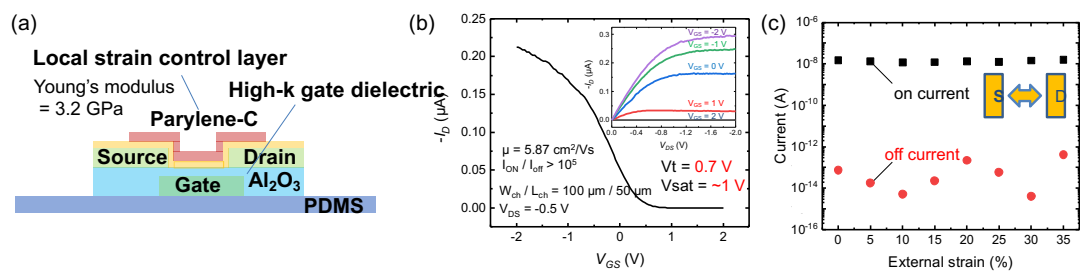


図1 局所歪み制御層をもつ伸縮可能なCNT TFT。(a)素子構造、(b)I-V特性、(c)外部歪みに対するオン電流とオフ電流の変化。

・フレキシブルCNTアナログ集積回路の実証

新たに開発したばらつき耐性を持つ回路構成を用い差動増幅器を基本とし、演算増幅器を設計、プラスチックフィルム上に作製した(図2)。なお、設計した演算増幅器はシングルエンドの低インピーダンス出力を実現するための出力回路も設けている。作製した演算増幅器は±1.5Vの低電圧で動作し、負荷抵抗を最適化するための機構を設けたことにより、53.3dBという高い利得を得た。これを用いて非反転増幅器などの負帰還回路を実現し、極めて安定な増幅器を得ることに成功した。

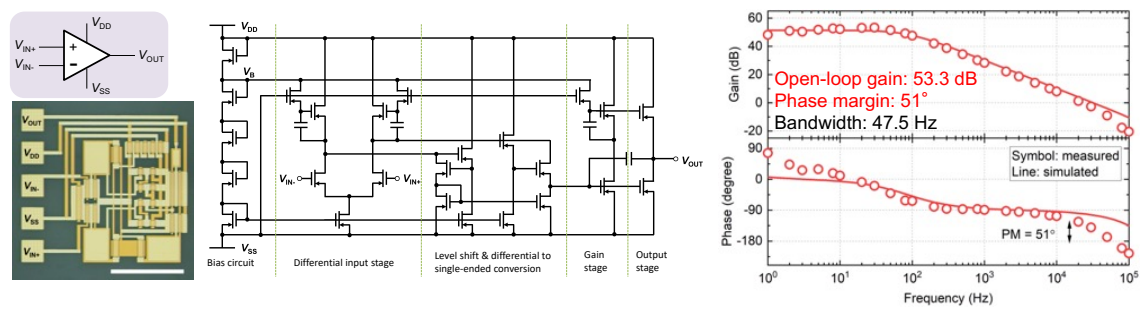


図2 CNT演算増幅器の回路構成と特性。

・精密ドーピングによるCMOS型アナログ集積回路の実現

ウェアラブルデバイスにおいては電源が限られ、回路の低消費電力化も重要な課題であり、低消費電力化技術としてCMOSが有効である。本研究では、化学ドーピングによりキャリアの極性を制御しフレキシブルなCNT CMOSを実現した(図3)。n型にはKOH/benzo-18-crown-6-ether complex saltを、p型にはAg bis(trifluoromethane-sulfonyl)imideを用いた。pMOSとnMOSの両方のドーピング濃度とプロセス条件を最適化するとともに、表面パッシベーションプロセスを精密に検討し、0.5Vの低電圧電圧を実現した。126個のCMOSインバータの伝達特性を測定

し、そのしきい値の均一性を明らかにするとともに、それらのうちで最も悪い組み合わせにおいても、十分なノイズマージンを持つことを確認し、これらの CMOS インバータのどの組み合わせにおいても論理信号を次段に連続して伝達できることを確認した。

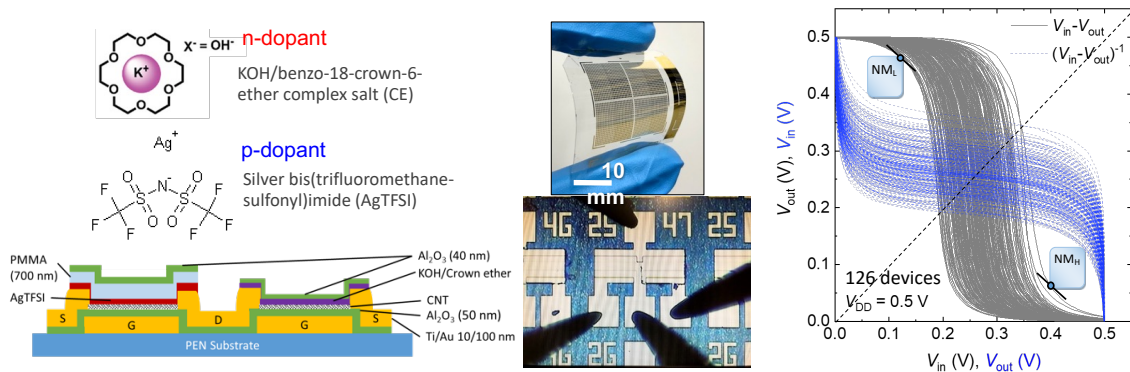


図 3 化学ドーピングにより作成したフレキシブル CNT CMOS.

・ CNT アナログフロントエンドの設計と試作

本研究の集大成として、センサデバイスにおいて最も重要な回路であるアナログフロントエンドの実現に取り組んだ。ECG のような生体信号は 1 mV 程度の小さな振幅を持ち、アナログフロントエンドは微弱なセンシング信号を増幅し、デジタル信号に変換する。この回路は、信号品質と S/N 比を向上させ、信号の信頼性を確保するために不可欠である。これまでに実現している回路設計技術を駆使し、演算増幅器をベースとして、計装アンプやバンドパスフィルタ、非反転増幅器、A/D コンバータで構成されるアナログフロントエンド回路を設計し、プラスチックフィルム上に実現した (図 4)。作製したアナログフロントエンドは ± 1.5 V の低電圧で動作するとともに、長時間の安定動作も確認した。ファンクションジェネレータでシミュレートした ECG 信号を入力し、作製したアナログフロントエンドを用いて ECG 信号の検出の実証を行った。出力されたデジタル信号から再構成した波形には、狭心症や心筋梗塞で見られる ST 低下や ST 上昇などの特徴が確認され、作製した CNT アナログフロントエンドの動作を実証した。

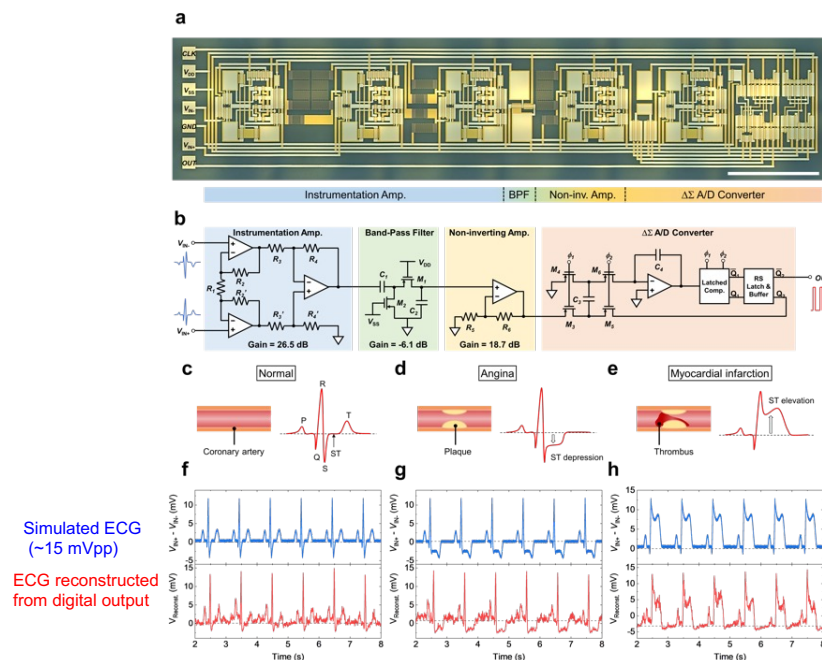


図 4 作製したアナログフロントエンド回路の回路構成と ECG 信号の検出の実証。

本研究では、特に CNT デバイスの最も困難課題であった特性ばらつきや不安定性の課題について、デバイス技術のみならず回路設計技術の両面から取り組み、A/D 変換器を集積したアナログフロントエンド回路などのデジタル/アナログ混載回路の実現まで至るなど、当初予定以上の成果を得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sun Yun, Li Pengpeng, Kauppinen Esko I., Sun Dong-Ming, Ohno Yutaka	4. 巻 12
2. 論文標題 Key factors for ultra-high on/off ratio thin-film transistors using as-grown carbon nanotube networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 16291 ~ 16295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2RA02088B	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Tan Fu Wen, Hirotsu Jun, Kishimoto Shigeru, Ohno Yutaka	4. 巻 61
2. 論文標題 PMMA/Al ₂ O ₃ bilayer passivation for suppression of hysteresis in chemically doped carbon nanotube thin-film transistors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 034002 ~ 034002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Oshima Hisayoshi, Iwase Katsunori, Ohno Yutaka	4. 巻 61
2. 論文標題 In situ monitoring of the electrical property of carbon nanotube thin film in floating catalyst chemical vapor deposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 038002 ~ 038002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4a5e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Matsunaga Masahiro, Hirotsu Jun, Ohno Yutaka	4. 巻 15
2. 論文標題 In-plane dual-electrode triboelectric nanogenerator based on differential surface functionalization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 027006 ~ 027006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac4d07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Endo Masanori, Uchiyama Haruki, Ohno Yutaka, Hirotni Jun	4. 巻 15
2. 論文標題 Temperature dependence of Raman shift in defective single-walled carbon nanotubes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 025001 ~ 025001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac4678	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Funayama Keita, Tanaka Hiroya, Hirotni Jun, Shimaoka Keiichi, Ohno Yutaka, Tadokoro Yukihiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Carbon Nanotube-Based Nanomechanical Receiver for Digital Data Transfer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 13041 ~ 13047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.1c02563	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Funayama Keita, Hirotni Jun, Miura Atsushi, Tanaka Hiroya, Ohno Yutaka, Tadokoro Yukihiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Tunable carbon nanotube diode with varying asymmetric geometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 075212 ~ 075212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0058300	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Momaya Divyang, Ohno Yutaka	4. 巻 60
2. 論文標題 Effect of electrochemical functionalization of single-walled carbon nanotube electrodes in flexible enzymatic biofuel cells	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 068002 ~ 068002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac0261	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawaguchi Atsushi, Uchiyama Haruki, Matsunaga Masahiro, Ohno Yutaka	4. 巻 14
2. 論文標題 Simple and highly efficient intermittent operation circuit for triboelectric nanogenerator toward wearable electronic applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 057001 ~ 057001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abf405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tan Fu Wen, Hirotsu Jun, Kishimoto Shigeru, Ohno Yutaka	4. 巻 61
2. 論文標題 PMMA/Al ₂ O ₃ bilayer passivation for suppression of hysteresis in chemically doped carbon nanotube thin-film transistors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 034002 ~ 034002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5264	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Oshima Hisayoshi, Iwase Katsunori, Ohno Yutaka	4. 巻 61
2. 論文標題 In situ monitoring of the electrical property of carbon nanotube thin film in floating catalyst chemical vapor deposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 038002 ~ 038002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4a5e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsunaga Masahiro, Hirotsu Jun, Ohno Yutaka	4. 巻 15
2. 論文標題 In-plane dual-electrode triboelectric nanogenerator based on differential surface functionalization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 027006 ~ 027006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac4d07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Endo Masanori, Uchiyama Haruki, Ohno Yutaka, Hirotni Jun	4. 巻 15
2. 論文標題 Temperature dependence of Raman shift in defective single-walled carbon nanotubes	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 025001 ~ 025001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac4678	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Funayama Keita, Tanaka Hiroya, Hirotni Jun, Shimaoka Keiichi, Ohno Yutaka, Tadokoro Yukihiro	4. 巻 4
2. 論文標題 Carbon Nanotube-Based Nanomechanical Receiver for Digital Data Transfer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Applied Nano Materials	6. 最初と最後の頁 13041 ~ 13047
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnm.1c02563	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Funayama Keita, Hirotni Jun, Miura Atsushi, Tanaka Hiroya, Ohno Yutaka, Tadokoro Yukihiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Tunable carbon nanotube diode with varying asymmetric geometry	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 075212 ~ 075212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0058300	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Momaya Divyang, Ohno Yutaka	4. 巻 60
2. 論文標題 Effect of electrochemical functionalization of single-walled carbon nanotube electrodes in flexible enzymatic biofuel cells	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 068002 ~ 068002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac0261	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawaguchi Atsushi, Uchiyama Haruki, Matsunaga Masahiro, Ohno Yutaka	4. 巻 14
2. 論文標題 Simple and highly efficient intermittent operation circuit for triboelectric nanogenerator toward wearable electronic applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 057001 ~ 057001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abf405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計47件 (うち招待講演 33件 / うち国際学会 27件)

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon nanotube-based flexible electronics: From transistors to circuits and neuromorphic computing
3. 学会等名 2.5D Materials; NANOCARBON seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno, T. Watanabe, K. Tatsumi, A. Kawaguchi, A. S. Aji, and H. Uchiyama
2. 発表標題 Carbon nanotube-based flexible memory devices for neuromorphic computing
3. 学会等名 2022 MRS Fall Meeting & Exhibit (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Shingu, T. Watanabe, and Y. Ohno
2. 発表標題 Physical reservoir computing using electrochemical reaction at carbon nanotube electrodes
3. 学会等名 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 N. Yokota, H. Uchiyama and Y. Ohno
2 . 発表標題 Fabrication of ultra-thin, carbon nanotube-based flexible devices with sacrificial layer of graphene oxide
3 . 学会等名 35th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Ohno, A. S. Aji, T. Watanabe, A. Kawaguchi and H. Uchiyama
2 . 発表標題 Carbon nanotube-based reservoirs for neural network computing
3 . 学会等名 12th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Watanabe, H. Uchiyama and Y. Ohno
2 . 発表標題 Reservoir computing in carbon nanotube thin-film transistors
3 . 学会等名 12th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Y. Ohno
2 . 発表標題 Carbon nanotube-based flexible electronics: From transistors to circuits and machine learning
3 . 学会等名 12th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 N. Mitsuzawa, T. Kashima, H. Kataura and Y. Ohno
2 . 発表標題 Design and Fabrication of low-power flexible sensing circuits based on carbon nanotube
3 . 学会等名 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Shingu, T. Watanabe, and Y. Ohno
2 . 発表標題 Reservoir computing based on electrochemical reaction at carbon nanotube electrode
3 . 学会等名 The 63rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Watanabe, H. Uchiyama and Y. Ohno
2 . 発表標題 Physical reservoir computing using multi-terminal carbon nanotube thin film transistors
3 . 学会等名 The 63rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 N. Yokota, H. Uchiyama and Y. Ohno
2 . 発表標題 Fabrication and characterization of carbon nanotube flexible devices with sacrificial layer of graphene oxide
3 . 学会等名 The 63rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 A. S. Aji and Y. Ohno
2. 発表標題 CNT/HfO2/CNT resistive random-access memory with long retention time for flexible data storage applications
3. 学会等名 The 63rd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno, T. Kashima, and M. Matsunaga
2. 発表標題 Stretchable and transparent triboelectric nanogenerators based on carbon nanotubes for self-powered wearable devices
3. 学会等名 15th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon Nanotube Thin-Film Devices for Fully-Flexible Electronics
3. 学会等名 241st ESC Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Low-Voltage Operable, Flexible Analog/Digital Mixed-Signal Integrated Circuits Based on Carbon Nanotubes
3. 学会等名 2022 MRS Spring Meeting & Exhibition (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブ薄膜トランジスタへのスマネン吸着とその効果
3. 学会等名 ナノカーボン研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブが拓く半導体エレクトロニクス：いよいよ始まる実用化と将来展望
3. 学会等名 研究会「1次元、2次元物質科学の展望と課題」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 ウェアラブルデバイスのための伸縮可能な摩擦帯電型エネルギーハーベスタ
3. 学会等名 日本繊維機械学会講演会「エネルギーハーヴェスティングに寄与する新素材と応用技術」（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 半導体カーボンナノチューブエレクトロニクスの最新動向
3. 学会等名 第49回炭素材料学会年会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 ナノカーボンの次世代エレクトロニクスへの応用展開
3. 学会等名 2次元材料に関する第5回Koine Meeting (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横田奈菜花, 内山晴貴, 大野雄高
2. 発表標題 酸化グラフェンを犠牲層に用いた極薄フレキシブルデバイスの作製
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊丈士, 内山晴貴, 大野雄高
2. 発表標題 多端子カーボンナノチューブ薄膜トランジスタを用いた物理リザーブコンピューティング
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀 秀汰, 内山 晴貴, 片浦 弘道, 大野 雄高
2. 発表標題 自己整合プロセスによる非対称ゲート構造カーボンナノチューブ薄膜トランジスタの作製
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Zhongrui Wang, Haruki Uchiyama, Yutaka Ohno
2. 発表標題 Study on Variability of Carbon Nanotube Thin-film Transistor-based CMOS Differential Amplifiers
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野 拓海, 内山 晴貴, 焼山 佑美, 櫻井 英博, 高 燕林, 丸山 実那, 岡田 晋, 片浦 弘道, 大野 雄高
2. 発表標題 各種フルオロスマネンによるカーボンナノチューブへのキャリアドープ効果の評価
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松永正広, 大野雄高
2. 発表標題 フッ素樹脂-PDMS混合材料を用いた高出力摩擦帯電型発電シート
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Funayama, H. Tanaka, J. Hirotsu, K. Shimaoka, Y. Ohno, and Y. Tadokoro
2. 発表標題 Carbon nanotube-based nanomechanical receiver for digital data transfer
3. 学会等名 The 62nd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Design and fabrication of flexible analog/digital mixed-signal circuits based on carbon nanotube thin film transistors
3. 学会等名 11th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy and Environment (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon nanotube-based flexible electronics
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kashima and Y. Ohno
2. 発表標題 Design and fabrication of flexible analog/digital mixed-signal circuits based on carbon nanotube thin film transistors
3. 学会等名 The International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon nanotube technologies for flexible electronics
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kashima and Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon Nanotube-based Analog/Digital Mixed-signal Integrated Circuits for Flexible Sensors
3. 学会等名 The 11th International Conference on Flexible and Printed Electronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブの半導体応用の展開
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 CNT薄膜を用いた透明・伸縮性を有する摩擦帯電型発電シート
3. 学会等名 新たな環境発電技術の研究開発動向 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブ関連の最近の動向について
3. 学会等名 SDRJ 2021年度 第3回BC・MtM合同委員会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松永正広, 川口敦司, 廣谷潤, 大野雄高
2. 発表標題 Carbon nanotube-based stretchable and transparent triboelectric nanogenerator toward wearable electronics
3. 学会等名 第31回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブのフレキシブル電子デバイス応用
3. 学会等名 第15回ナノカーボン実用化WG 特別講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Funayama, H. Tanaka, J. Hirotsu, K. Shimaoka, Y. Ohno, and Y. Tadokoro
2. 発表標題 Carbon nanotube-based nanomechanical receiver for digital data transfer
3. 学会等名 The 62nd Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Design and fabrication of flexible analog/digital mixed-signal circuits based on carbon nanotube thin film transistors
3. 学会等名 11th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy and Environment (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon nanotube-based flexible electronics
3. 学会等名 The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kashima and Y. Ohno
2. 発表標題 Design and fabrication of flexible analog/digital mixed-signal circuits based on carbon nanotube thin film transistors
3. 学会等名 The International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon nanotube technologies for flexible electronics
3. 学会等名 34th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kashima and Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon Nanotube-based Analog/Digital Mixed-signal Integrated Circuits for Flexible Sensors
3. 学会等名 The 11th International Conference on Flexible and Printed Electronics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブの半導体応用の展開
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 CNT薄膜を用いた透明・伸縮性を有する摩擦帯電型発電シート
3. 学会等名 新たな環境発電技術の研究開発動向（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブ関連の最近の動向について
3. 学会等名 SDRJ 2021年度 第3回BC・MtM合同委員会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野雄高
2. 発表標題 カーボンナノチューブのフレキシブル電子デバイス応用
3. 学会等名 第15回ナノカーボン実用化WG 特別講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 演算増幅回路	発明者 大野雄高, 鹿嶋大雅	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2021/014143	出願年 2021年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 演算増幅回路	発明者 大野雄高, 鹿嶋大雅	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2021/014143	出願年 2021年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フィンランド	アアルト大学			