

平成 31 年 4 月 19 日現在

機関番号：32621

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18887

研究課題名(和文) ナノコラムレクテナの開発

研究課題名(英文) Development of nanocolumn rectenna

研究代表者

中岡 俊裕 (Toshihiro, Nakaoka)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：20345143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：LEDディスプレイなど活発に研究されているGaNの柱状結晶であるナノコラムを用いたナノコラムレクテナという新しい発電素子を提案し、電磁界シミュレーションおよび素子試作によりその有望性を実証した。EBリソグラフィと電子線蒸着により、ナノコラム領域のみに、チタンと金を成膜し、斜め蒸着によりナノコラムをコーティングした。SOG(Spin-On-Glass)にてナノコラムの先端付近まで埋め込み、絶縁膜Al2O3をその上部に成膜し、最後に多層グラフェンを載せ上部透明電極とした。本構造により基礎特性の測定に成功した。本ナノコラムレクテナ素子作成に求められる各プロセス工程において手法、基盤技術を確立できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在主にマイクロ波帯で用いられ、ICカードなどで既に実用化されているレクテナが光領域で動作すれば、全く異なる原理で動作する光センサーや太陽電池となる。従来にはない機能を持ち、例えば太陽電池では赤外光の利用は難しいが光レクテナでは、可視光よりも赤外光のほうが動作しやすく、廃熱発電や熱センサーとして期待できる。この実現には極限的な微細構造が必要で、特に集積化が困難であったが、本研究により提案したナノコラムレクテナは優れた集積性、位置制御性によりこのボトルネックを突破しうる。電磁界シミュレーション、試作を通してその有望性を示した本研究は学術的、社会的に高い意義を持つと言える。

研究成果の概要(英文)：We proposed a novel device called nanocolumn rectenna, which uses GaN nano-columns, being actively studied for LED display. The rectenna is promising for converting visible and near-infrared light into electricity. We designed the structure on the basis of electromagnetic simulation. We established the fabrication method required for the nanocolumn rectenna, which consisted of nanocolumns covered by a thin Au layer, embedded in spin-on-glass (SOG) and a top semi-transparent, graphene electrode. The thin Au cover layer was formed by employing oblique angle deposition. The basic characteristics suggested its promise for the nanocolumn rectenna.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：レクテナ ナノコラム

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

レクテナは **rectifying antenna** の略でマイクロ波の整流変換に用いられている。最も単純な回路はアンテナとダイオードを用いるものでダイオードによる受電整流により、RF/DC 変換を行い、DC 電力を得る。身近な例は **Suica** に代表される非接触式 IC カードであり、電子読取機からのマイクロ波をレクテナにより受信し、IC を起動している。単一周波数に対する理論変換効率は 100% であり、実際、2GHz 帯で 90% 以上の高変換効率がすでに実証されている。もしこのようなレクテナをマイクロ波からテラヘルツ、赤外、可視光へと短波長側へ拡張できれば、センサー、創電素子として極めて魅力的である。太陽電池とは全く異なる原理で発電するため従来にない特徴を持つ。例えば太陽電池では利用の難しい赤外光に対し、光レクテナでは可視光よりも容易に応答し、廃熱発電や熱センサーとして期待できる。

レクテナの動作する電磁波の周波数はアンテナのサイズと回路 (アンテナ、ダイオード) の抵抗  $R$ 、容量  $C$  による時定数  $RC$  で決定される。原理的には RF レクテナをサイズ縮小し、 $RC$  時定数を小さくすることが出来れば、赤外光、可視光領域であっても動作する。光の帯域までレクテナを広帯域化する光レクテナは概念的には古くから提案されており切望されてきた。しかしながら、 $RC$  時定数による制限の突破が困難で長年机上のものであった。電子ビーム描画をはじめとするナノテクノロジーの進展に伴い、2000 年前後から効率は極めて低いものの実験的に原理実証されるようになり、2015 年にカーボンナノチューブを用いた先行研究により起電力  $\sim 0.5\text{mV}$ 、変換効率  $\sim 10^{-5}\%$  が報告された。この研究では単一接合の 10000 倍以上相当の起電力が得られており、ナノアンテナの集団効果の重要性が指摘されているが、アンテナが複雑に絡み合ったカーボン・ナノチューブであるため集団効果の議論はできていない。

## 2. 研究の目的

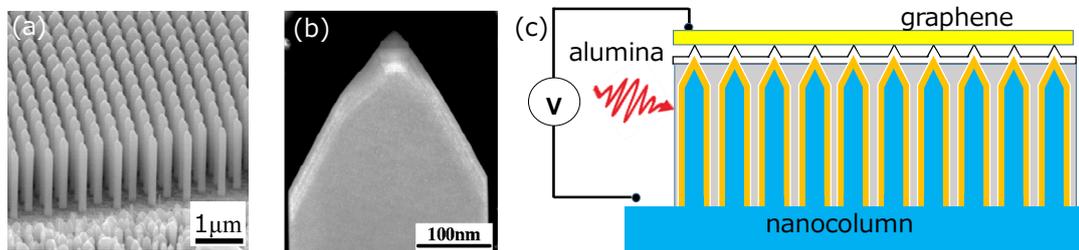


図 1: (a)典型的なナノコラム。(b)鉛筆状のナノコラム先端[H. Sekiguchi, K. Kishino et al., Phys. Stat. Sol. C (2010)より]。(c)提案するナノコラムレクテナの構造。

本研究は、精緻な集積性に優れ[図 1(a)]、鉛筆状の鋭利な先端構造[図 1(b)]をもつナノコラムを新しい光レクテナへ応用するナノコラムレクテナ [図 1(c)] を提案し、その有望性実証を目的とする。

ナノコラムレクテナは、ナノコラムを金属で覆い共鳴アンテナとして用い、鋭利な先端構造を利用して MIM (Metal-insulator-metal) トンネルダイオードを作成し、構成する。次のような特徴を持つと期待できる。高度集積性により未解明であるナノアンテナの集団効果を解明できると期待できる。ナノコラムは GaN で構成されており、高剛性、高耐熱性といった GaN の特徴は廃熱発電などの応用上でも有利である。光吸収共鳴波長はナノコラム高さに依存するため、同一基板上に異なる高さのナノコラムを集積できるので、複数波長対応のセンサーが可能となる。

### 3. 研究の方法

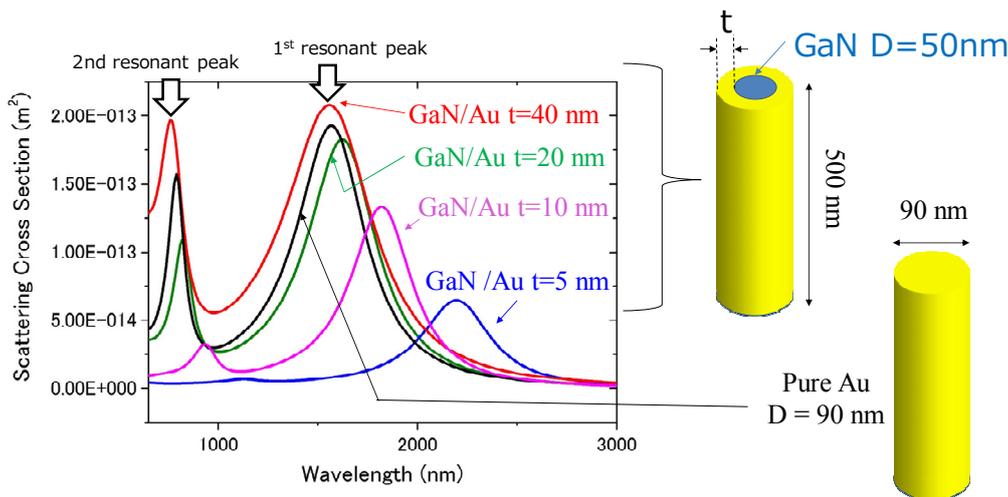


図 2: 電磁界シミュレーションにより求めた Au 被膜 GaN ナノコラムの散乱スペクトル (30°入射)。

まず、本アンテナの設計のために電磁界シミュレーションを行った。GaN ナノコラムは円柱でモデル化した。図 2 に Au 被膜 GaN ナノコラムと Au のみの円柱金属アンテナの散乱スペクトルの比較を示す。いずれも波長 1500-2200nm 付近に 1 次の共鳴ピーク、波長 800-1000nm 付近に 2 次の共鳴ピークが観測される。Au 被膜 GaN ナノコラムは直径が同程度の Au のみの円柱金属アンテナとほぼ同じ強度の散乱を示しており、Au 被膜ナノコラムは金属アンテナとして動作することを実証できた。本結果に基づき、ナノコラムレクテナを設計した。

古典的なアンテナ理論では  $\lambda = 2L, L, \dots$  のときに共鳴し、本ナノコラムでは 1000nm, 500nm に対応する。しかしながらシミュレーション結果では 1.5-2 倍程度長波長側にずれている。また古典アンテナ理論と異なり、シミュレーション結果は厚みに大きく依存する。これらは、この波長帯では Au は完全導体とみなせず、表面インピーダンス、skin depth、形状効果が生じ、さらに可視光領域ではプラズモニックな効果が発現するためであり、ナノコラムレクテナの設計指針となるだけでなく、光物性としても興味深い。

設計に基づき素子を試作し、測定は顕微分光測定系とプローバー、半導体パラメータアナライザを用いて行った。

### 4. 研究成果

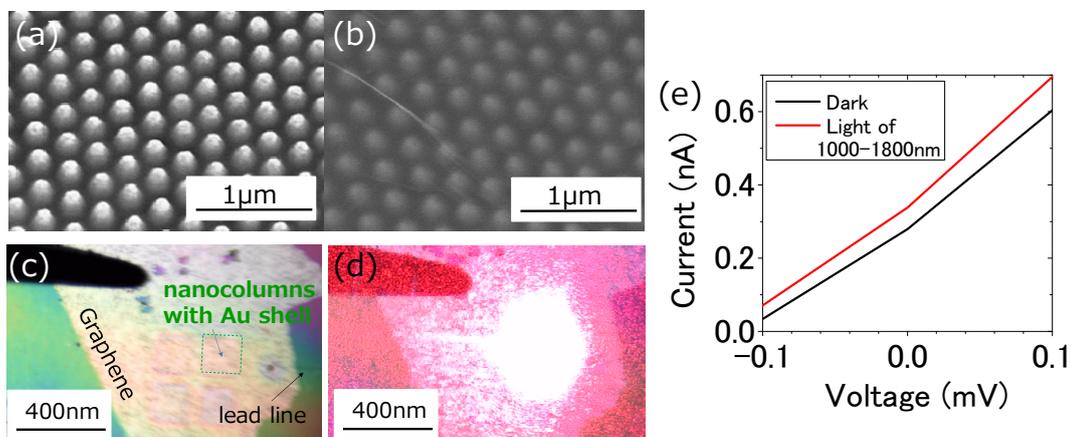


図 3: (a)Au 被膜後、先端部以外を SOG にて埋め込んだナノコラム。(b)グラフェンを被せた同構造。(c)光照射なし (d) 集光した赤色光(650nm)照射時のプローバーによる測定の様子。(e)光照射ない場合(dark)とランプによる近赤外光照射時の I-V 測定結果。

素子は複数試作した。良好な特性を示した最終的な構造は次のとおりである。電子線リソグラフィと電子線蒸着により、ナノコラム領域、引き出し線、電極パッド部に、Ti と Au を成膜した。角度をつけて基板を回転させることでナノコラムを Au で被膜した。リフトオフ後、SOG (Spin-On-Glass) にてナノコラムの先端付近まで埋め込み[図 3(a)]、絶縁膜  $\text{Al}_2\text{O}_3$  をその上部に成膜し、最後に多層グラフェンを載せ上部透明電極とした[図 3(b)]。

図 3(c)に示すようにプローブを用いて多層グラフェンとナノコラムへの Au 被膜間に電圧印加し電流測定をおこったところ、FN トンネルによるトンネルダイオード特性が得られた。また、LCR メータにより静電容量測定を行い、グラフェン下のナノコラム本数に対応する静電容量を得た。この素子に 1000-1800nm のランプ光  $10\mu\text{W}$  を  $0.3\text{mm}\phi$  に集光し図 3(d)のように照射したところ、図 3(e)に示すようにレクテナ動作(光アシストトンネル)に期待される正の方向の  $50\text{pA}, 10\mu\text{V}$  程度の短絡電流、開放電圧を得た。一方、 $2\text{mW}$  の  $650\text{nm}$  のレーザーでは光電流による逆方向(マイナス方向)の電流変化を得た。前述のシミュレーション結果によると本ナノコラムの共鳴波長は  $1800\text{nm}$  付近にあり、波長依存性は本電流変化がレクテナ動作によるものであることを示している。起電力の定量的な値についてはより精緻な検討が必要であり、その後には本成果を発表していく予定である。本試作ではナノコラム直径  $100\text{nm}$  程度のものを用いたが、直径  $30\text{nm}$  以下の細線ナノコラムが最近報告されており、効率についてはこれらより細いナノコラムを用いることで改善できる見通しである。以上、本研究成果はナノコラムレクテナ素子作成に求められる作成手法をはじめとする基盤技術の確立、有望性の実証と位置づけられる。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

Shubham Gosain, Yodvarit Prukthichaipat, Toshihiro Nakaoka, Electromagnetic simulation for nanocolumn rectennas, 2018 年第 79 回応用物理学会秋季学術講演会[20p-211A-10], 2018 年

[その他]

上智大学教員データベース <http://rscdb.cc.sophia.ac.jp/Profiles/70/0006956/profile.html>  
Research map <https://researchmap.jp/read0076935/>

※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、研究者個人に帰属されます。