

3.6.3 未来 ICT 研究所 ナノ ICT 研究室

室長 大友 明 ほか 17 名

高機能新規材料とナノ構造を用いた革新的光通信デバイス技術の研究開発

【概要】

低消費エネルギー化、低コスト化、循環利用可能な汎用資源活用等により環境負荷を抑制しつつ情報通信の高速高効率化を可能とするために、高い光・電子機能性を有する有機分子材料や超伝導材料などの新規材料を用いて、ナノ構造構築技術を応用することでその光・電子機能を効果的に発現させる研究開発を行い、従来技術では達成困難な超高速光変調技術や高効率単一光子検出技術などの確立を図る。また、光・電子制御機能をさらに高める新材料の開発やナノスケールの光・電子機能複合化技術、高次ナノ構造作製・応用技術の研究開発により、通信の要素技術である、光検出、光変調／スイッチング、電磁界センシング等に革新をもたらす基礎技術の研究開発を総合的に推進する。

(1) 有機ナノ ICT 基盤技術の研究開発

有機化合物の高効率な電気光学機能を利用し、既存材料を用いた技術では達成し得ない 100GHz 以上の高速光変調の実現を目指した研究開発を行う。また、有機化合物の多様な光・電子機能の高効率化と、ナノ構造や分子配列による電磁場制御機能の高精度化を図ることで、ナノ構造デバイスにおける光制御機能の高効率化効果を実証し、超小型光変調器や光スイッチ、高機能電磁界センサなどの革新的 ICT 基盤技術を確立する。

(2) 超伝導 ICT 基盤技術の研究開発

巨視的量子現象である超伝導を利用した高効率な単一光子検出システムや光・超伝導インターフェイスを開発し、半導体技術では達成できない高速・高感度光検出技術と低消費エネルギー情報通信システムの基盤技術を確立する。

【平成 23 年度の成果】

(1) 有機ナノ ICT 基盤技術の研究開発

- ① 有機電気光学デバイス作製基盤として、有機電気光学分子のより正確な電気光学機能の評価を行い、図 1 に示すような分子内水素結合により π 共役構造が安定化することで電気光学機能が増大する効果を発見し、有機電気光学分子の更なる高機能化に向けた新たな分子設計指針を獲得した。また、光架橋性有機電気光学ポリマーの合成に成功し、成膜後の架橋により耐溶媒性を発現することで、有機電気光学ポリマーの積層ができることを確認した。これにより、有機電気光学ポリマーの積層技術を適用した高効率な電気光学機能を有する導波路作製方針を確定した。
- ② 有機電気光学光導波路への高効率光カップリングに向けた有機ポリマー光導波路端面加工プロセスの検討を行い、チップング 1 μm 以下の高精度ダイシング加工技術とトリプルイオンミリングによるミラー研磨技術を組み合わせた高精度素子端面加工プロセスの開発に成功した（図 2）。
- ③ 無機ナノフォトニック構造の高精度ナノ加工に向けた加工条件の最適化を行い、ナノフォトニック構造作製技術の高精度化を実現した。さらに、数値モデル解析により有機・Si ハイブリッドナノフォトニック光制御素子のデバイス構造設計を行い、高精度加工技術により基本的な Si フォトニック結晶デバイス構造の試作に成功した。

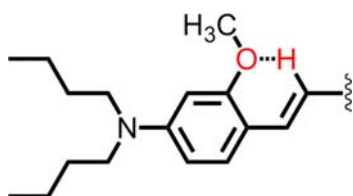


図 1 分子内水素結合による構造安定化

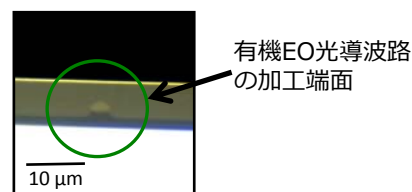


図 2 有機ポリマー光導波路の高精度加工端面

- ④ ナノ構造デバイスにおける光制御機能の効率化実現のための技術基盤として、光機能性分子のナノスケール配向・配列制御基盤技術の開発に取り組み、これまで観察例のなかった固液界面上に精密に2次元配置された光機能性分子（ハロロドプシン）の液中でのナノ分解能直接観察に成功した。また、配向制御された光機能性分子薄膜を用いて、生体視覚機能を模した抑制領域と興奮領域を有する人工視覚機能型光センサ（図3）を試作し、空間変位に対する微分応答特性などの素子レベルの演算処理機能の基本特性確認に成功した（図4）。

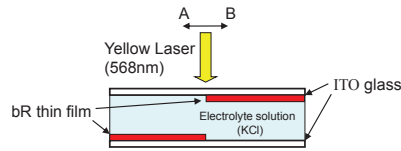


図3 人工視覚機能素子の構造

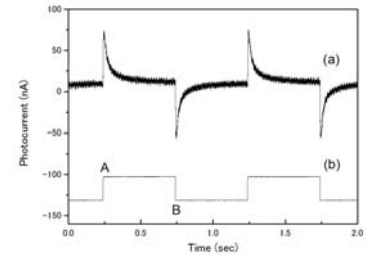


図4 空間変位の微分応答特性

(2) 超伝導 ICT 基盤技術の研究開発

- ① 超伝導単一光子検出器 (SSPD) の検出効率を改善するため、光波長 1,550nm で最適な光キャビティ構造（図5）を設計し、SSPD の特性を劣化させることなくキャビティ構造を形成するための作製プロセスの開発に成功した。キャビティ構造を有する素子への基板（厚さ 0.4mm の MgO）裏面からの照射系を開発し、キャビティ構造を設けることで検出効率が2倍以上改善することを明らかにした（図6）。結果として、検出効率が最大 20% を超える素子の作製に成功した。
- ② SSPD の暗計数の起源について理論的検討を行い、極薄 NbN（窒化ニオブ）膜の2次元伝導性に起因したボータックス・アンチボータックス・ペアの生成が関連していることを明らかにし、さらなる検出効率の改善指針を獲得した。
- ③ 光/磁束量子インターフェースモジュールの高速動作評価を行うため、65GHz の高周波プローブ・ケーブル 16 本と光ファイバ導入ポートを配備した冷凍機システムを構築した。高周波ケーブルからの熱流入の影響及び試料ステージ温度の温度振動を抑制するためのステージ構造を設計し、到達温度 4.5K、温度振動 1mK 以下を達成、小規模単一磁束量子 (SFQ) 回路の動作に成功した。また、NbN 単一磁束量子集積回路作製プロセスの開発を行い、達成可能な回路規模の指標となるジョセフソン接合の特性均一性を評価し、 $3\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ 接合 1,000 個で $\sigma \sim 3\%$ を達成し、NbN 単一磁束量子回路の動作実証に向けて大きく前進した（図7）。

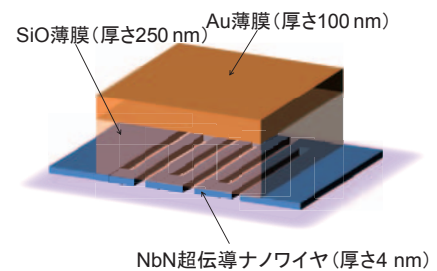


図5 光キャビティ構造を導入した SSPD の概念図

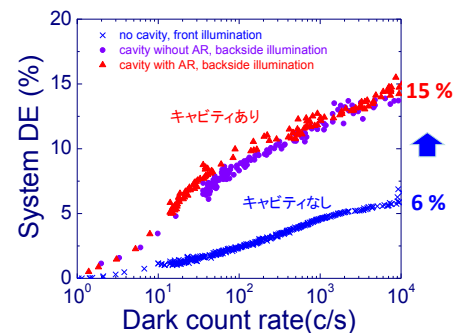


図6 キャビティ構造の有無による検出効率の比較

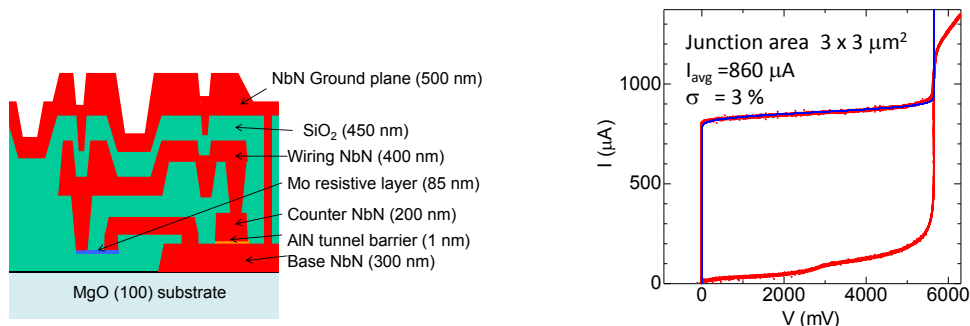


図7 NbN 集積回路の断面構造およびジョセフソン接合 1,000 個直列素子の電流-電圧特性