

### 2.12 ナノ ICT 基盤技術

近年の情報通信サービスの多様化と普及によって通信量が急激に増加していることから、情報通信ネットワークの更なる高速化と大容量化が要求されている。しかし、既存技術の延長線上での高速化・大容量化は電力消費の増大を招くことから、革新的なシステムとその基盤となる ICT ハードウェア技術の革新が不可欠となっている。NICT では、有機分子材料や超伝導材料などの優れた光・電子機能と、先進のナノ構造制御技術を駆使し、光検出効率や光変調速度、消費電力などの性能を、従来の材料を用いた技術では達成不可能なレベルへ向上させる、革新的な ICT ハードウェア技術の研究開発を行っている。有機材料は、分子内の  $\pi$  共役電子が光の電磁場と共鳴することから、無機材料に比べて高速で高効率な光応答を示す。また、超伝導材料は、完全導電性や磁束の量子化など他の材料にはないユニークな物性を有している。しかし、光と物質との相互作用が基本的に小さいため、その材料性能を高めるだけでは素材が持つポテンシャルを十分に引き出すことは難しい。一方、最新のナノ加工技術によって、光の電磁場や分子間相互作用を精密に制御することが可能となってきている。すなわち、精緻なナノ構造を作製し、光を微小空間に閉じ込める、あるいは相互作用領域を限定するなどして、有機材料や超伝導材料と光との相互作用を高効率化させることにより、ICT デバイスの革新的な性能を実現することが我々の研究目的である。NICT では、有機材料及び超伝導材料とナノ技術を融合した研究(有機ナノ ICT 基盤技術の研究及び超伝導 ICT 基盤技術の研究)を、基礎・材料研究の段階から長期にわたって行ってきており、一部のテーマは既に応用の実を結んできています。例えば、超伝導デバイスの研究では、窒化ニオブ (NbN) の薄膜形成技術やナノワイヤ作製技術を確立し、電磁波や光応答特性に優れた超伝導デバイス技術を創出してきた。その技術基盤に基づいて作製される超伝導単一光子検出器 (SSPD) は、従来用いられてきた半導体アバランシェフォトダイオードに比べて遥かに高い性能が実現され、既に量子暗号通信システムのキーデバイスの1つとして不可欠な存在となっているとともに、微弱光検出を必要とする様々なアプリケーションへの展開が期待されている。有機デバ

イスにおいても、有機電気光学 (EO) ポリマーを用いた 100 GHz を超える超高速光変調技術の実現が視野に入ってきている。既に、電気光学特性において従来の無機材料 (LiNbO<sub>3</sub>) を凌駕する性能の有機 EO ポリマーの開発に成功しており、高速光変調器は試作の段階に進んでいる。さらに、ナノ加工により作製したシリコンフォトニック結晶と有機 EO ポリマー材料を融合することで、光変調器そのものをマイクロメートルスケールに小型化する研究にも取り組んでいる。以下に、ナノ ICT 分野の主な研究成果について紹介する。

#### 2.12.1 第1期中期計画

##### (1) 有機ナノ ICT 基盤技術の研究

###### a) 機能向上のための分子設計・合成技術

有機分子の光、電子、及び電気的特性を効果的に発現させるためには、構成分子の結合状態と電子状態の空間的制御、及びエネルギー移動の方向制御により、分子そのものの機能ポテンシャルを高めることがまず重要である。当研究では、分子の電子構造制御に加え、分子間の結合の方向性、複合分子組織体の大きさ、形状などを制御し、分子単体の光、電子機能だけでなく、デバイス構造における機能発現や安定性などの総合的な機能向上を試みた。3次元的に空間制御された分子組織体である dendrimer 構造を用いて、dendrimer の骨格中に色素を導入し、色素間のエネルギー移動による発光機能の失活や光酸化による退色を抑制することに成功した (平成 14 年 Applied Physics Letters 誌等掲載)。

###### b) 自己組織化による分子デバイス高次構造作製と評価

これまで半導体デバイスの高性能化のために取り組まれてきた、大きな素材を小さく加工していくトップダウン方式の素子作製技術では、分子間の相互作用を高度に制御することは困難であり、分子を積み上げて高次構造を構築するボトムアップ方式の素子作製技術の開発が不可欠である。NICT では、ナノスケールサイズの有機分子構造体が有する自己組織化現象に注目し研究に取り組んできた。自己組織化による高次構造作製では、まず、目的とする構造や特性を数ナノメートルスケールの分子

構造にブレークダウンして設計し有機化学的に合成する。これを分子ユニットとして基板や電極上に散布し、分子ユニット間の相互作用に基づいて隣接ユニットを結合させる。この方式によれば、ちょうどレゴ®ブロックを組み立てていくような感覚で原子・分子スケールの高次な構造を比較的容易に作製することができる。

代表的な機能性分子であるポルフィリン分子について、ターシャリーブチルフェニル基を付加することで、ブチル基が金属基板上で移動するための“足”として機能し、シアノフェニル基を付加することで水素結合により選択的結合する“手”として機能することが、高分解能の走査トンネル顕微鏡 (STM) 観察により明らかとなった (図2.12.1) (平成13年 Nature 誌掲載)。この技術を発展させ、異なる化学活性を有する複数種の分子構造体から成る8 nm ピッチの微細グリッド構造を自己組織化現象によって自発形成させる技術も開発している。

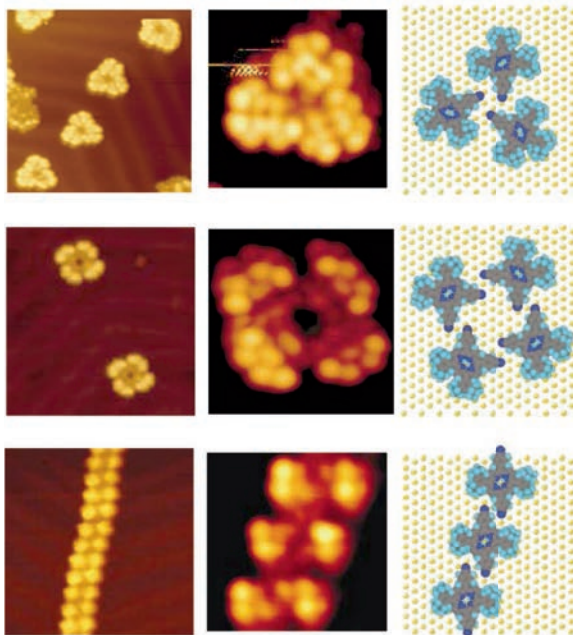


図2.12.1 自己組織化した分子のSTM像

有機分子を基板上に配置し電子デバイスとして動作させるためには、絶縁性基板上で分子を配置しなければならない。しかし、絶縁性基板上ではSTMによる観察ができないため、分子配置を確認できないことから、絶縁性基板上で分子構造を確認する技術の開発にも取り組んできた。非接触型原子間力顕微鏡 (NC-AFM) の高性能化を行い、SrTiO<sub>3</sub>単結晶基板の原子レベルで平坦な表面を作製する技術を開発することで、この表面に有機分

子ユニットを配置し、平成15年に、絶縁性基板上に配置された分子ユニットの非接触型原子間力顕微鏡による高分解能観察に世界で初めて成功した (図2.12.2)。

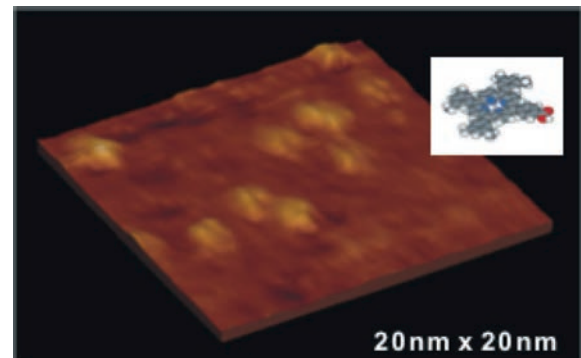


図2.12.2 絶縁体基板上分子の分子分解能 AFM

有機分子を基板上に配置し自己組織化をさせるためには、分子を加熱により気化し真空槽内部に分子線として導入する必要がある。しかし、複合機能を有する分子は分子量が大きく、気化せずに熱分解してしまう。このような非揮発性/熱分解性の試料分子を電氣的に中性状態のまま真空槽内部に分子線として導入する方法として、スプレー・ジェット技術を開発した (図2.12.3)。この技術は非揮発性/熱分解性をもつ分子でも、溶媒さえ選べば試料溶液を準備することは可能であることが多いという発想に基づいている。つまり試料溶液を出発点として常圧下で試料溶液を噴霧し、得られたミスト粒子を従来気体で中性分子線を生成するのと同様にパルスノズルを用いて真空槽に導入する技術である。

有機分子の高効率発光と自己組織化構造を用いたレーザー発振にも取り組んだ。コレステリック液晶をラビング処理した基板の間に挟むと、基板に対して垂直に配向

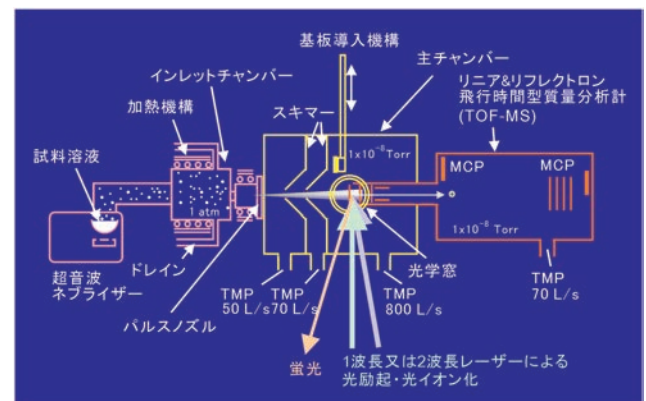


図2.12.3 スプレー・ジェット装置

した超分子らせん構造を示し、1次元フォトニック結晶と見なすことができる。平成15年に蛍光色素をドープした液晶セルから、フォトニック結晶の反射バンドに起因する低しきい値の円偏光レーザー発光を確認した。さらに、交流電場によるレーザー発振の可逆制御にも成功した。

## (2) 超伝導 ICT 基盤技術の研究

### a) 高周波デバイス

NbN の高周波デバイスとしての実用化を目指すために MgO 基板の導波管技術の開発を行い、平成14年に世界で初めてテラヘルツ帯導波管型 NbN SIS 受信機の開発に成功した(図2.12.4)。また、テラヘルツ帯低雑音受信機として期待されている HEB ミキサの研究では、平成14年に0.93 THz で510 K の低雑音動作に成功し、当時、NbN HEB ミキサとして世界最高性能を示した。

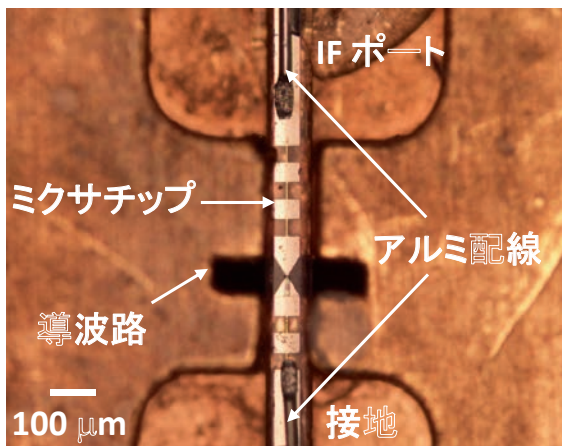


図2.12.4 900GHz帯 NbN 導波管型 SIS ミキサブロック

### b) 超伝導単一磁束量子 (SFQ) 回路

超伝導を利用した SFQ 論理回路は、CMOS 回路より4桁小さい0.01~0.1 aJ (アトジュール:  $10^{-18}$  ジュール) で動作する、究極の低エネルギー情報処理技術である。SFQ 回路では、超伝導ループの中で量子化された磁束 (磁束量子:  $2.07 \times 10^{-15}$  T) を情報担体として使用する。複数の超伝導ループとループ内の磁束量子を出し入れするためのスイッチとして機能するジョセフソン接合を組み合わせることで、あらゆる論理演算を実現できる。論理ゲートにおける消費電力、動作遅延は極めて小さく、高速性も兼ね備えており、100 GHz を上回る動作が実証されている。

平成11年に SFQ 回路の研究を始めて2年後の平成13

年には、all-NbN 集積化回路技術を開発し、16ビットシフトレジスタ、バッファなどの SFQ 回路の10 K 動作に世界で初めて成功した。1万接合大規模 SFQ 回路という挑戦的な目標に向けて研究開発を行い、NEC、名古屋大学、横浜国立大学との連携により、大規模 SFQ 回路セル設計技術と集積回路作製技術を確立した。平成15年には、超伝導 SFQ ネットワーク要素回路(図2.12.5)を開発し、世界最高速 (45 GHz) の動作に成功した。

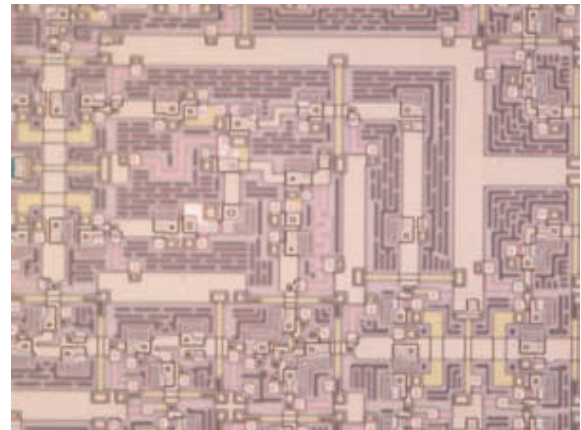


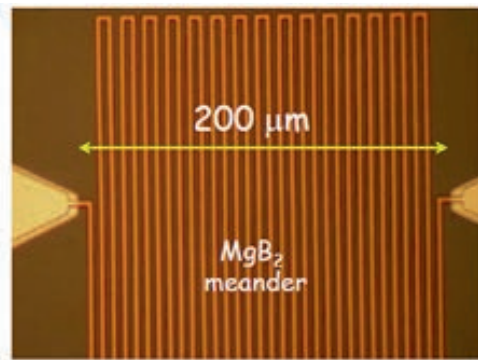
図2.12.5 大規模 SFQ 回路を用いたネットワーク要素回路

### c) 超伝導量子ビット

NbN の新たな研究方向の探索として、平成14年に米国カンサス大学との共同研究により、NbN 量子ビット素子を開発し、固体量子ビットデバイスとして世界最長デコヒーレンス時間 (5  $\mu$ s) を達成した。この結果は、同年 Science 誌に掲載され、被引用回数は350回を超えている。その後、平成16年に米国 NSF 財団の競争的研究資金を獲得し、5年間の共同研究を行った。

### d) ニホウ化マグネシウム (MgB<sub>2</sub>) デバイス

平成13年に新しい超伝導体 MgB<sub>2</sub> を発見し、それに伴い、薄膜・デバイス化を目指した研究を行った。共蒸着法による MgB<sub>2</sub> の高品質薄膜の作製技術を確立するとともに、平成15年に世界で初めて MgB<sub>2</sub> トネル接合の作製に成功した。また、戦略的創造研究推進事業 CREST の研究に参画し、大阪府立大学、日本原子力研究開発機構、大阪府立産業技術総合研究所などとの共同研究により、MgB<sub>2</sub> 中性子検出器 (図2.12.6) を開発し、平成17年に既存の中性子検出器より2桁速い高速動作を実証した。

図2.12.6 MgB<sub>2</sub>中性子検出器

## 2.12.2 第2期中期計画

### (1) 有機ナノ ICT 基盤技術の研究

#### a) 自己組織化による分子デバイス高次構造作製と評価

有機分子を組み上げる手法としては、2.12.1 (1) b) で述べた他に、DNA などの生体高分子の自己組織化によって形成される構造を分子配列制御のテンプレートとして利用する方法も有望である。DNA はアデニン (A)、グアニン (G)、シトシン (C)、チミン (T) という4種の塩基から成るが、A-T、G-C といった特定の組み合わせに基づく相補的な結合を形成することから、この配列を制御することで2次元のみならず3次元の高次構造を人工的に作製することが可能となる。我々は、DNA の分子配列構造を確認する方法として、高分解能の溶液ナノプローブ技術を開発し、平成20年に光入力による DNA の動的構造変化観察を世界最高の高解像度で観測することにも成功した。また、翌年には液中にて DNA のストランド構造 (3 nm) や光機能性分子 (ハロロドプシン) のナノ分解能直接観察に成功した (図2.12.7)。

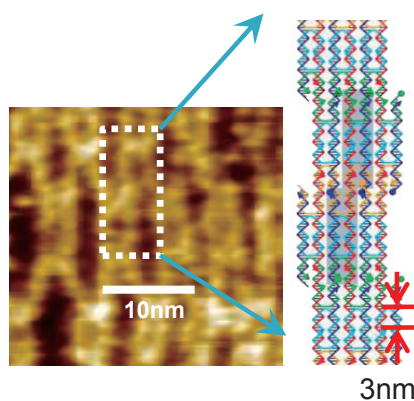


図2.12.7 DNA ストランド構造の高分解能液中観察

#### b) 単一分子レベルのデバイス

有機材料を分子レベルまでスケールダウンすることで、バルク材料では困難であった単一光子や単一電子の操作や制御が可能になる。これにより、超省エネルギーで動作する光・電子デバイス、量子的な原理に基づいて情報処理を行うデバイスが実現する。

単一分子または数個の分子から成るデバイスを作製した際、数 nm の領域にアクセスするインターフェースが必要になる。単一分子への電氣的インターフェースとして、集束イオンビームを用いてギャップ幅の3 nm ナノギャップ電極を作製し、単一分子の電気伝導特性測定に成功した。光学的インターフェースの場合は、通常用いる光の波長が数百 nm であり分子レベルの領域に個別にアクセスすることは不可能である。これを解決するため金属界面を伝搬する表面プラズモンを利用することを研究してきた。平成20年、数値計算により電界を集中させる構造や光のモードによって3.5 nm 以下の大きさに700倍以上の光強度を集光することが可能であることを示した (図2.12.8)。また平成22年には、表面プラズモン超集束を電気信号で動的に制御する構造を考案し、3次元数値解析シミュレーションにより動作を検証するとともに、SOI 基板を用いて超集束の電氣的制御構造を試作した。

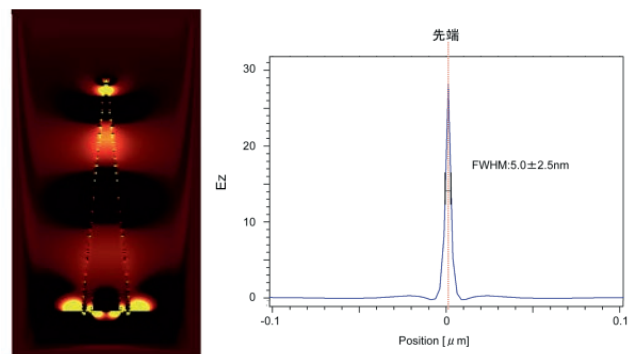


図2.12.8 金属表面を伝搬する表面プラズモンによるナノ集束

単一分子レベルの素子として、ナノギャップ電極間に光機能分子やフォトクロミック分子をコートしたナノ粒子を配置し、光ゲート型分子単一電子トンネル素子を試作、平成20年に光による単電子トンネル (SET) 特性のゲート変調を確認した (図2.12.9)。また、平成22年には有機ワイヤー分子と金ナノ粒子から成るハイブリッド材料のダブルドット単電子トランジスタ構造を、自己組

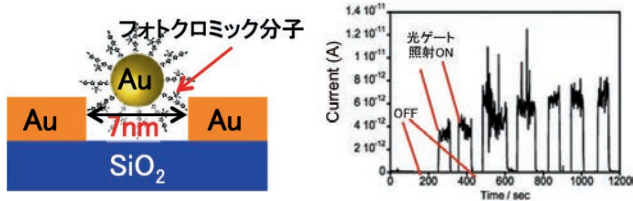


図2.12.9 SET デバイス構造と光ゲート特性

織化手法を用いて作製し、ハイブリッド粒子間の相互作用を反映した微分コンダクタンスの超周期構造を世界で初めて観測した。

その他、単一分子計測・解析及び単一光子発光などの評価のために、平成20年に特殊仕様の高感度光検出器PMTとイオン液体を用いた高真空下高NA高S/Nの発光計測系の開発、ナノスケールの素子の信号処理アーキテクチャとして、平成19年からブラウン運動を利用した低発熱で高効率の可逆非同期セル・オートマトン回路の考案などを行った。

(2) 超伝導 ICT 基盤技術の研究

a) 高周波デバイス

大学共同利用機関法人自然科学研究機構国立天文台からの受託研究によりALMAバンド10用NbN導波管型SIS受信機を開発し、平成19年に0.8THzで量子雑音7倍程度の低雑音動作に初めて成功した。また、中国科学院紫金山天文台(PMO)との共同研究によりNICT製0.5THz帯超伝導SIS受信機をPMOのポータブルサブミリ波電波望遠鏡(図2.12.10)へ搭載した。このNbN SIS受信機は、平成19年12月31日午前5:35:14にオリオンAのCOスペクトルを観測し、世界で初めてNbN SIS受信機の実用化に成功した。この結果は、平成20年のスペース・テラヘルツ国際会議とApplied Physics



図2.12.10 PMO サブミリ波電波望遠鏡

Letters誌で発表され、電波天文分野にも大きなインパクトを与えた。平成7年にNbN/AlN/NbNトンネル接合を用いた準光学SISミキサの開発から、MgO基板を用いた導波管技術まで、実用化の第一歩を踏み出すには12年の歳月を要した。

b) 超伝導量子ビット

NbN量子ビット素子の研究は、平成22年以降、日本電気株式会社、独立行政法人理化学研究所、国立大学法人東京大学との共同研究に発展し、エピタキシャルNbN接合を用いたトランズモン型量子ビット研究の研究として現在も継続している。この共同研究で得られた成果は、その後平成23年にApplied Physics Letters誌、平成25年にPhysical Review Letters誌に掲載され、材料科学という観点から超伝導量子ビットのデコヒーレンス要因を明らかにしようとする試みとして注目を集めている。

c) 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SSPD)

SSPD素子は図2.12.11に示すように、厚さ10nm以下の超伝導薄膜から成るナノワイヤを受光面積全体にメアンダ状(蛇行状)に敷き詰めた構造をしている。超伝導臨界電流よりもわずかに小さいバイアス電流を流した状態でSSPDに光子が入射すると、光子のエネルギーで超伝導状態が壊れ、素子の両端に電圧が発生する。この電圧を室温のエレクトロニクスで計測することで、高効率に光子を検出できる。SSPDは、アバランシェフォトダイオード(APD)などの半導体光子検出器に比べて、圧倒的に高い検出効率、低暗計数率、低ジッタ、広い波長感度領域など優れた性能を有しており、量子光学、量子情報通信技術、生体医療計測等、様々な分野での応用が期待されている。

SSPD素子作製に向けて、電子線リソグラフィ技術及び反応性イオンエッチングによって、線幅100nmの

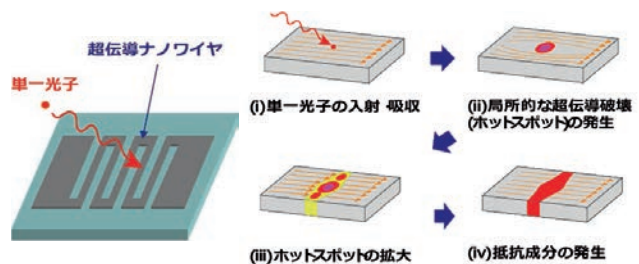


図2.12.11 SSPD の概念図と動作原理

メアンダ状のナノワイヤにパターニングする加工技術を確立した。受光部面積は、入射単一光子との高い光結合効率を得るために、15-20  $\mu\text{m}$  角程度とした。平成19年には、NEC、米国 NIST、NICT 量子 ICT グループとの共同研究により SSPD を用いた量子暗号鍵配送 (QKD) フィールド実験を行い、世界最長距離 (97 km)、最高速 (10 kbps/photon) を達成し、平成22年には東京 QKD ネットワークでの実証実験に成功した。

#### d) 光・超伝導インターフェース

SFQ 回路を用いた光・超伝導インターフェース研究は、超伝導 SFQ 回路と光デバイス技術を融合し、フォトニックネットワークへの応用を目指している。この研究では、超伝導技術だけではなく、低温で動作する InGaAs フォトダイオード (MSM-PD) や、MSM-PD と超伝導マイクロストリップ線路を集積化した極低温動作光入力モジュールなどの研究開発を、超高速フォトニックネットワークグループと光デバイスプロジェクトとの連携によって推進してきた。その結果、4.2 K における極低温動作通信波長帯 MSM-PD と光モジュールの開発に成功し (平成22年に Applied Physics Letters 誌に掲載)、また、光入力モジュールと SFQ チップを接続し、光パルスから SFQ パルスへの変換動作の検証実験を行い、光パルスにより SFQ パルスの発生を実証した (平成23年に IEEE Transaction on Applied Superconductivity 誌に掲載)。

### 2.12.3 第3期中期計画

#### (1) 有機ナノ ICT 基盤技術の研究

##### a) 機能向上のための分子設計・合成技術

有機電気光学分子の電気光学機能強化のための分子設計では、世界最高性能の有機電気光学分子の合成に成功し、平成23年に図2.12.12に示すような分子内水素結合により  $\pi$  共役構造が安定化することで電気光学機能が増

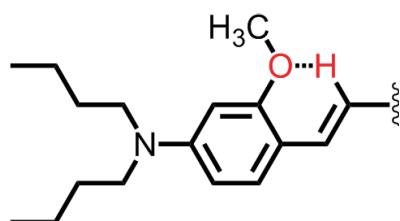


図2.12.12 分子内水素による構造安定化

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。

##### b) フォトニック結晶構造による有機分子の発光制御

有機分子を利用した光デバイスを実現するにあたり、デバイスサイズをナノスケールや分子スケールまでスケールダウンするだけでは、光と分子の相互作用が小さいために、実用的な機能を得ることは容易ではない。特に単一分子を光デバイスとして利用するためには、吸収断面積が非常に小さい単一分子に対して効率よく光を作用させたり、単一分子から効率よく光を取り出したり、単一分子の光機能を自在に制御したりするための技術開発が必要となる。我々は、ナノメートルスケールの微小空間において光閉じ込めや伝搬制御を可能にするフォトニック結晶 (PC) に着目し、有機分子の発光制御の実現に取り組んできた。単一分子からの発光制御を行うために、低バックグラウンド発光の無機酸化物材料を用いた可視光領域のフォトニック構造を設計・製作し、平成24年に共振モードとの結合による発光寿命の長寿命化を確認した (図2.12.13)。

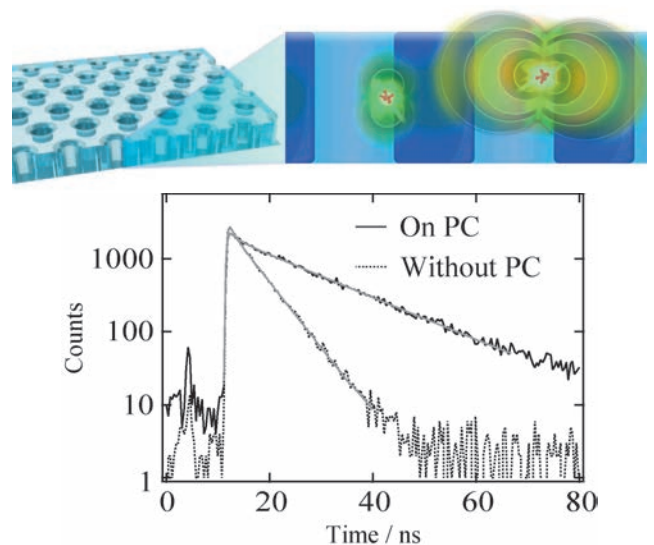


図2.12.13 フォトニック結晶による単一分子の発光抑制

##### c) 有機 EO ポリマー光変調器

光変調技術は光通信において情報伝送速度を決定する基幹技術であり、低電力で100 GHz を越える超高速変調を可能にする有機 EO ポリマーが注目を集めている。NICT では、光通信技術の超高速化と省電力化に向けて、EO ポリマー材料の開発から変調器やスイッチ、光集積回路技術の研究までを総合的に行っている。EO ポリ

マーは、EO 効果を示す分子をポリマー中に分散した材料であり、分子内水素結合を利用した独自の分子設計指針により、世界最高性能の EO 分子の開発に成功している。EO ポリマー光変調器の作製では、基板に電極／下部クラッド／EO ポリマー／上部クラッド／電極の積層構造を作製する。しかし、一般的なポリマーは、有機溶媒に可溶であるために、積層構造を作製できない。我々は、光架橋性有機 EO 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させることで、平成24年にオールポリマーの高効率な有機 EO 変調器構造の作製に成功した(図2.12.14)。これまで、光変調器の基本特性を評価し、平成25年には、50 GHz の高周波信号に対する光応答を確認している。

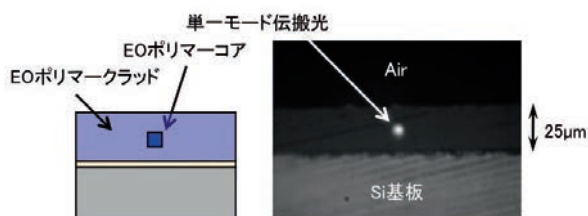


図2.12.14 オール EO ポリマー光変調器

光通信技術は、長距離通信だけでなくサーバー間のデータ通信から集積電子回路中の光配線までの応用が進められている。これに伴い、光変調器の小型省電力化が重要な研究課題となっている。NICT では、有機 EO ポリマーと Si フォトニック結晶構造を組み合わせることで、光変調器の高速化と小型化を同時に実現することを

目指して研究を行っている。これまで、高精度な Si 加工技術を確立し、平成25年に従来デバイスに比べて素子サイズで1/100の有機 EO ポリマーとシリコン1次元フォトニック結晶導波路のハイブリッド EO 変調器を試作し光変調動作を実証した(図2.12.15)。

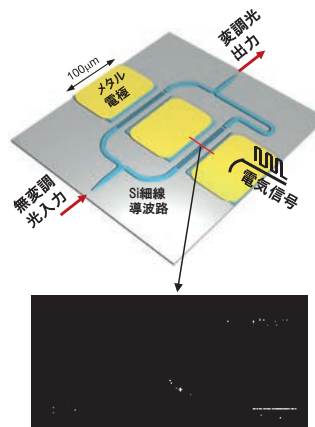


図2.12.15 超小型 EO 変調器

#### d) 生体分子を用いた高機能光検出器

数十億年をかけて創りだされた生物は現在の技術でも作りだすことが困難な高度な機能を有したナノスケールのバイオ分子を有している。このバイオ分子そのものを利用して現在の技術と融合することにより、生体システムの高度な機能を活かした新たなバイオミメティック人工システムが実現できる。

光機能性生体分子膜バクテリオロドプシン (bR) は、光駆動のプロトンポンプ機能を有しており、電極と電解液界面の bR に光を照射すると時間微分応答性の光電流

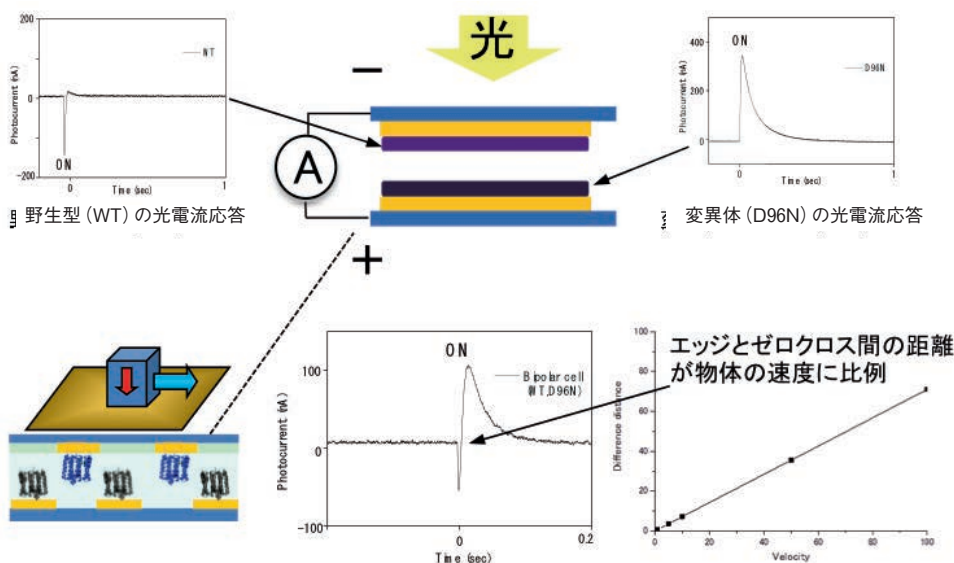


図2.12.16 bR オプティカルフロー検出器のバイポーラセルの基本動作

が得られ、光強度の変化のみに応答する信号が外部から電源供給を受けることなく得られる。平成23年にbRを用い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の確認に成功した。また、平成24年に配向制御膜のパターニングにより双極型光検出器構造を作製し、素子レベルのエッジ検出機能の確認にも成功した。平成25年には、bRの野生型と遺伝子操作により光応答時定数を大きくした変異型とを組み合わせオプティカルフロー検出器を試作し、単一のバイポーラセルの基本動作確認(図2.12.16)を行うとともに、その実験データをもとに光学的相対速度場検出のシミュレーションを行い、動作特性を検証した。

## (2) 超伝導 ICT 基盤技術の研究

### a) 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD)

ナノワイヤは膜厚4 nmの非常に薄い超伝導薄膜であるため、ナノワイヤ層の光吸収効率(NbNは30%程度)によって検出効率が制限されるという問題があった。NICTでは、ナノワイヤ層での光吸収効率を改善するために、ナノワイヤ層の両側に光反射層を持つダブルサイドキャビティ構造を導入し、平成25年には、暗計数率40 cpsにおいて80%のシステム検出効率、約67 psの低ジッタを実現し(図2.12.17)、APDを遥かに凌ぐ性能を達成した。

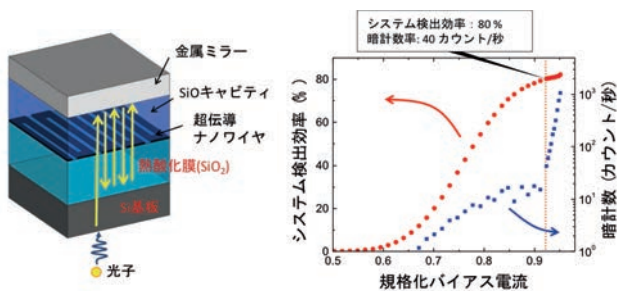


図2.12.17 ダブルサイドキャビティ SSPD の概念図と検出効率

SSPD素子の本質的な応答速度は、励起電子のエネルギー緩和時間に依存し、NbN薄膜を用いた場合の緩和時間は30 ps程度と非常に短く、本質的な動作周波数は数十GHzに達する。しかし、現実のSSPD素子の応答速度は、長いナノワイヤ長に起因する素子の寄生イン

ダクタンスによって制限されている。素子の小面積化により寄生インダクタンスを低減することが可能であるが、受光面積の減少は検出効率の低下を招く。高い検出効率を維持しつつ高速化を実現する方法として、小面積化素子の開発とそのアレイ化に取り組んできた。しかし、アレイ化した素子では、多数の信号線からの熱流入により冷却効率が減少することから、本中期計画において冷却された同一素子内でのSFQ回路による信号処理を提案した(図2.12.18)。平成25年には、SFQ回路による信号処理を用いた4ピクセルSSPDアレイの検出効率の入射光子数依存性から計数率100 MHz以上を確認し、シングルピクセルの25 MHzからの向上を実証している。また、これまで、高速化のためにナノワイヤのフィリングファクタを減少すると検出効率も減少すると考えられていたが、平成25年に数値シミュレーションによりフィリングファクタを通常の50%から16%に低減しても75%のシステム検出効率を得られることを確認し、低フィリングファクタ化により最大計数率がこれまでの25 MHzから2.8倍の70 MHzに向上することを実証した。

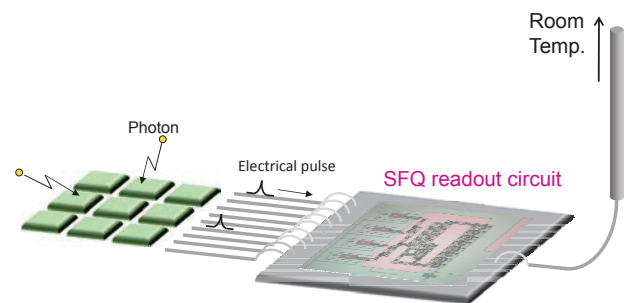


図2.12.18 SSPDアレイ化とSFQ信号処理

### b) 光・超伝導インターフェース

超伝導ナノワイヤを利用した光検出器の応答時間を評価し、平成25年に、受光面積を従来の $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ から $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ に小型化することにより応答時間を14 nsから0.3 nsへと大幅に高速化できることを確認した。また、同年 $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ の受光面積でエラーレートが $10^{-12}$ 以下となるために必要な1パルス当たりの光子数は約54,000と見積もられ、10 GHzの動作周波数においても従来の半導体フォトダイオードよりも1桁以上低い70  $\mu\text{W}$ の光入力パワーで動作することを確認した。