

関西支部日より

関西支部 2018 年度第 2 回講演会・見学会が 7 月 20 日（13 時 30 分～16 時 50 分）に情報通信研究機構・未来 ICT 研究所第 1 研究棟大会議室（神戸市西区）において開催された。今回は「超伝導デバイス、有機 EO デバイス開発の最前線」と題して講演と見学を行った。参加者総数 28 名（大学・研究所関係 15 名、会社関係・一般 13 名）であった。関西支部長の横山彰一氏による開会挨拶に続き、情報通信における次世代デバイスとして注目を集める 2 件の講演と機構内施設の見学があった。以下にプログラムを示す。

1. 「開会挨拶」 関西支部支部長
2. 「NICT における超伝導デバイスの研究開発」  
寺井弘高氏（情報通信研究機構）
3. 「NICT における有機 EO デバイスの研究開発」  
大友明氏（情報通信研究機構）
4. 施設見学会：超伝導デバイス、バイオ ICT、脳情報通信
5. 「開会挨拶」 関西支部副支部長

寺井氏の講演では、NICT において開発が進められている超伝導ナノワイヤを使った単一光子検出器（SSPD）および超伝導量子ビットデバイスの研究開発状況が紹介された。

まず、超伝導ナノワイヤを使った SSPD に関する発表について紹介させていただく。

SSPD は深紫外から中赤外にかけての幅広い周波数帯域で利用でき、その応用分野は量子情報通信をはじめ、バイオ・医療分野まで多岐にわたっている。また、単一光子検出器として使用するためには、 $10^{-8}$  lx（ルクス）以下の検出感度が必要であり、そのような感度を持つものとして光電子増倍管やアバランシェフォトダイオードがあるが、NICT が量子情報通信分野用途に開発した波長 1,550 nm の光に対して最適化された SSPD は、光子の検出効率 90 % 以上、出力信号の時間揺らぎ（ジッター）が 20 ピコ秒以下の優れた性能を有しており、この波長帯で利用可能なアバランシェフォトダイオードと比較しても、多くの点で優れた特性を有していることが示された。

この波長 1,550 nm 用に最適化されたデバイスの構造や動作原理についての詳細な説明において、SSPD では光子 1 個のエネルギーでホットスポットを形成し超伝導状態を破壊する必要があるため、デバイス作製に用いる NbN 超伝導薄膜の厚みは僅か 5 nm で、これを幅 100 nm のメアンダライン構造に加工している。また光子の検出原理は、このようなナノワイヤで構成されるメアンダライン領域に光子を照射することによりクーパ対の破壊と同時に局所的なホットスポットが形成

され、このとき超伝導ナノワイヤにバイアス電流を印加しておくことで、このホットスポット周辺の超伝導電流密度が臨界値を超えて常伝導状態へと転移するというものである。すなわち、ホットスポット領域にある超伝導ナノワイヤが抵抗状態となり、その両端に電圧パルスが現れるということである。この際、この電圧パルスを計測することにより光子の検出を行うことになる。

このとき SSPD システムとして高い光子検出効率を達成するためには、①デバイスへの光照射効率（光ファイバとの結合効率）、②ナノワイヤの光吸収効率、③電圧パルスの生成効率などが重要なファクターとなるが、これら効率を高め検出効率を高める方法が示された。①についてはシングルモードファイバからの出射光が漏れなくデバイスの受光面に照射されるよう、屈折率分布型（GRIN）レンズを使用して効率よくメアンダライン領域に光が集光する工夫がなされており、ほぼ 100 % のファイバ結合効率を達成している。また②ナノワイヤの光吸収効率を上げるために、キャビティ構造を改良し、メアンダライン構造が存在するシリコン基板と金属（Au または Ag）反射層との間に光を効率よく閉じ込めることに成功している。これによりほぼ 100 % の光吸収効率を達成している。また③光子の吸収に伴ってエラーなく電圧パルスを生成するためには超伝導ナノワイヤの膜質や厚みおよび線幅の均一性が非常に重要となる。このため超伝導特性の均一性が非常に優れた厚さ 5 nm の NbN 極薄膜の作製を可能とし、精度の高い電子線描画パターンニング技術で線路長に沿って特性が異なる幅 100 nm のナノワイヤ加工を実現している。

一方、SSPD の用途によってはより大きな受光面積が必要となることがあるが、その場合、超伝導ナノワイヤのカイネティックインダクタンス  $L_K$  が大きくなってしまい、 $L_K$  と抵抗  $R$  の比で決まる時定数  $L_K/R$  が大きくなるため SSPD の計測効率が落ちてしまうことになる。この対策として、個々のデバイスサイズは変えずに、そのマルチピクセル化により受光面積を大きくする試みがなされている。現在までに 6 ピクセルの SSPD デバイスにおいて、80 % の検出効率と 35 ピコ秒のジッターを有するデバイスの作製に成功している。

また、このマルチピクセル SSPD デバイスは 100 V の電源で動作する小型の 0.1 W 機械式冷凍機に実装し約 2.4 K まで冷却することが可能である。この冷凍機に限らず、このようなマルチピクセル SSPD デバイスを実装する上で必要となるバイアス電流印加用や信号読み出し用などのケーブルとして一般に使われる高周波用ケーブルを導入することは熱流入の点などから問題となる。これを解決するために、NICT では同じく超伝

導体デバイスで構成される単一磁束量子 (SFQ) 論理回路を使ったシグナルの読み出しを試みており、現在までに64ピクセルSSPDデバイスにおいて、光子検出に同期してアドレス情報をデジタル信号として出力することに成功している。このマルチピクセル化については、32×32ピクセルSSPDアレイの作製などさらなる高密度化も進められており、近い将来SSPDの高感度光子検出特性を有する超高感度イメージングシステムの開発も夢ではないであろう。

またSSPDの用途として医療・バイオ応用があるが、この場合に用いる光波長は1  $\mu\text{m}$  以下とのことである。この波長帯では現在光電子増倍管やSiアバランシェフォトダイオードが優位な状況であるが、何れこの波長帯においてもこれらに負けない優れた特性を有するSSPDの開発を行っていくとのことである。

次に、超伝導量子ビットデバイスの開発においては、現在ベースとなる超高品質な全窒化物超伝導体薄膜ジョセフソン接合作りが進められており、これまでに Si (100) 基板上にバッファ層として TiN (100) を堆積させることにより非常に平滑性の優れた完全エピタキシャル NbN/AlN/NbN ジョセフソン接合の作製に成功し、この積層膜を使用したコプレナー型共振器において Q 値として約  $7 \times 10^5$  を達成している。

また、ジョセフソン素子を利用した通常の超伝導量子ビットデバイスでは、ジョセフソン素子の接合両端の位相にねじれを発生させるため磁場などの外場を加える必要があるが、これがノイズの原因となっていた。これに対し、バリア膜に磁性体を挟んだ磁性ジョセフソン接合では、この位相差が  $180^\circ$  ねじれた「 $\pi$  状態」が自然に実現されるという。そのため磁性ジョセフソン素子を超伝導回路に組み込むことで、この位相ねじれを生じさせるのに必要な電流や磁場の導入機構を削減でき、超伝導デバイスの大規模化が容易になる。NICT では、これまでに MgO 基板上に界面平滑性に優れた NbN/CuNi/NbN 磁性ジョセフソン素子の作製に成功し、そのジョセフソン臨界電流を測定した結果、位相差として  $180^\circ$  ねじれた  $\pi$  状態が実現できていることを実験的に確認したという。これらの超伝導磁束量子ビットデバイスを使った今後の研究の進展が楽しみである。

大友氏の講演では、NICTにおける有機 EO デバイスの研究開発に関する紹介があった。光通信では電気信号と光信号の変換が不可欠であり、EO デバイスを用いた光変調器により、光の伝搬 (位相) を電気信号で制御する。EO (Electro-Optic) は電気光学効果であり、電場をかけると電場の強さに比例して屈折率が変化するポッケルス効果などがよく知られている。このとき



講演会の様子

の比例係数を性能指数と呼び、これが大きいほど EO 効果が大きく、そのため駆動電圧を低く抑えることができ、消費電力の節約になる。代表的な EO 材料として、液晶、強誘電体結晶、有機分子があげられる。液晶は、分子の回転に起因する配向分極で非常に大きな EO 効果を示すが、応答速度は遅くミリ秒程度である。LiNbO<sub>3</sub> に代表される無機強誘電体結晶はイオン分極であり EO 効果は小さいが GHz 程度の高速変調が可能である。有機色素分子は、 $\pi$  電子応答による電子分極に起因する効果であり、最も高速でかつ比較的大きな EO 効果が期待できる。現在、高速光変調器に用いられている材料は LiNbO<sub>3</sub> で、変調速度は 40 Gbps に達している。しかしながら、LiNbO<sub>3</sub> は無機誘電体結晶固有の限界からこれ以上の高速化は望めない。そこで、さらに高速変調可能な EO 材料として有機色素分子を用いた EO デバイスの開発が進められている。具体的に、光変調器の高速変調に関する指標として、変調帯域長  $f_{3\text{dB}}L$  (GHz $\cdot$ cm) が用いられる。これはその値が大きいほど高速変調性能がよく、LiNbO<sub>3</sub> で  $f_{3\text{dB}}L$  が 4.5 であるのに対し、有機 EO ポリマーでは  $f_{3\text{dB}}L$  が 300 を超える値をもつ。さらに有機 EO ポリマーは EO 性能指数も LiNbO<sub>3</sub> より大きな値を示し、光制御の高速化と低消費電力化を実現する材料として、注目を集め、開発が進められている。

有機 EO 材料の開発は 1982 年に遡るが、2000 年に 100 pm/V を超える FTC と呼ばれる EO 色素が開発されたのがブレイクスルーとなる。極性分子は一般に双極子を打ち消すように凝集する。これでは EO 効果を示さないため、EO 分子は凝集しないようにポリマーなどのホスト材料中に分散して用いる。これをガラス転移温度  $T_g$  以上に加熱し、電場をかけて配向させ、冷却するというプロセス (ポーリング) により、電場配向した有機 EO ポリマーを得ることができる。また、有機 EO ポリマーは  $T_g$  以上の温度で EO 効果が消えるため、高  $T_g$  化が実用に向けて必要不可欠になる。NICT では

クロスリンク EO ポリマーの高温安定性を評価し、105℃で長期間使用可能（10年後も92%のEO特性を保持）という結果を得、高耐熱性ポリマーの開発に成功した。

有機 EO ポリマーを用いた様々な応用研究が関連企業、大学との共同研究又は委託研究として進められている。光通信技術の高速化・大容量化を目指して、長距離通信では EO ポリマー導波路による有機ポリマー光変調器モジュール試作を行い、また、中短距離通信では EO ポリマー/Si 導波路ハイブリッド光変調器を試作し、その性能指数を評価している。また、3D ディスプレイ、超高速空間光通信、LiDAR（レーザーレーダー）などへの応用を目指した有機 EO ポリマー光フェーズドアレイの試作を行い、光偏向を確認し、ピッチコンバータを採用し、狭ピッチ化を行っている。さらに、EO ポリマーの2次の非線形光学効果を使ったテラヘルツ（THz）波の発生・検出が可能で、発生帯域は0.1~20THz 以上におよび、さらに微細加工も可能なため、有機 EO ポリマーは THz 波発生・検出装置の小型化と高効率も可能にする材料である。以上、詳細については必ずしも理解できていないが、様々な分野で応用研究が展開され、有機 EO ポリマーを用いたデバイスの研究開発最前線を体感することができた。

講演会終了後、約10人程度で3班に分かれて、超伝導デバイス、バイオ ICT、脳情報通信の施設見学を行った。超伝導デバイス実験室では冷凍機を開放中で、多くの同軸ケーブルが配線されている様子を見ることができた。コンパクトGM冷凍機で2Kまで冷えるとのことである。バイオ ICT では微生物を用いた化学物質認識デバイスの開発に関するプレゼンテーションがあった。大腸菌を用いて化学物質を識別し数値化する、利き酒ならぬ“利き化学物質”を目指しているとのことである。脳情報通信では NICT で開発したウェアラブル脳波計で自分の脳波を見ることができる。電極を改善し導電性ペーストが不要になり気軽に計測できるため、今後の用途しだいで急速に普及すると思われる。未来 ICT 研究所は多くの興味深い研究テーマを有し、そのごく一部の見学であったが、最前線を体感することができた。

見学会終了後、一旦講演会場に戻り、関西支部副支部長の武田実氏による閉会の挨拶で会を締めくくった。

講演会・見学会終了後、有志21名により恒例の懇親会が JR 大久保駅周辺の居酒屋で開催され、会員相互の交流を深めた。

最後に、今回の講演会・見学会の開催にあたり、場所のご提供および見学の企画をして頂きました情報通信研究機構・未来 ICT 研究所の皆様、話題のご提供を頂きました講師の先生方にこの場をお借りして厚くお礼を申し上げます。

(大阪大学 村上博成、大阪府立大学 野口 悟)



見学会の様子