

表面弾性波がつなぐ光とマイクロ波

野口 篤史 〈東京大学先端科学技術研究センター, JST さきがけ noguchi@qc.rcast.u-tokyo.ac.jp〉

岡田 彪利 〈東京大学先端科学技術研究センター okada@qc.rcast.u-tokyo.ac.jp〉

山崎 歴舟 〈東京大学先端科学技術研究センター, JST さきがけ rekishu@qc.rcast.u-tokyo.ac.jp〉

中村 泰信 〈東京大学先端科学技術研究センター, 理化学研究所創発物性科学研究センター yasunobu@ap.t.u-tokyo.ac.jp〉

列車のレールに耳をあてると、遠くを走る列車の音が聞こえることを知っている読者もいるだろう。金属でできたレールの中では音は遠くまで伝搬する。固体中の音波の中で「最も遅い」ものをレイリー波と呼び、この波は物体表面上をほとんど減衰することなく伝搬することが知られている。こうしたレイリー波などの表面弾性波をエレクトロニクスデバイスに組み込む試みは70年代から盛んに行われている。音速は光速に比べてずっと遅いため、同じ周波数の音波の波長は電磁波のものに比べておよそ5桁も短く、デバイスも非常に小型になる。こういった特徴により、携帯電話用のマイクロ波フィルターなど、小型音波デバイスがさまざまな形で利用されている。

近年になり、表面弾性波の量子レベルでの操作が着目されている。高い周波数と長い寿命を併せ持つ表面弾性波は、少ない熱励起と長いコヒーレンス時間により、それ自体としても量子系として優れた特徴を持っている。また、さらにピエゾ効果などの弾性効果を利用することで、固体デバイス中の様々な自由度と結合させることができるため、異なる量子系を結ぶための架け橋としての役割が期待されている。2014年には超伝導回路で構成された人工原子に表面弾性波フォノンを吸収させる実験が報告された。その他にも量子ドットや固体中の電子スピンなどと組み合わせた、表面弾性波を用いた量子デバイスの研究が広くなされるようになってきた。

上記のように異なる量子系を結合させた系をハイブリッド量子系と呼ぶ。機械振動子と電磁波の結合を利用する量子オプトメ

カニクスや、原子と光を相互作用させる共振器量子電磁力学など、多岐にわたるハイブリッド系が研究されている。ハイブリッド量子系は、異なる量子系の利点を互いに活かすことで、量子情報技術の発展に貢献することができる。このようにして、量子レベルの感度で物理量を測るセンサーや、量子中継器や量子メモリといった量子コンピュータの要素技術など、様々な研究が報告されている。

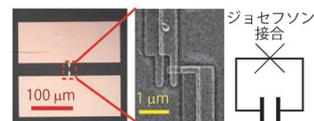
筆者らのグループにおいても、超伝導量子回路を表面弾性波と組み合わせたハイブリッド量子系の研究を行っている。最近の研究では、表面弾性波・超伝導量子ビット・マイクロ波共振器からなるハイブリッド量子系を実現し、その系を利用した表面弾性波の超高感度測定に成功している。こうしたハイブリッド量子系の研究のさらなる発展により、表面弾性波を量子レベルで扱うことができるようになり、その量子としてのフォノンの様々な量子状態制御や超伝導量子ビットとの量子もつれの生成、また量子メモリの開発など、より発展的な量子ハイブリッド系の実験につながると考えられる。

筆者らは、さらに表面弾性波とレーザー光の相互作用制御や、それらを用いたマイクロ波-光量子変換器に向けた研究に取り組んでいる。音波と光の光弾性効果による結合を光共振器によって強めることで、光を用いた表面弾性波の量子レベルの制御、またマイクロ波-光間の量子変換器など、量子インターフェイスとしての応用を考えるとすることができる。

—Keywords—

超伝導量子ビット (Transmon):

キャパシタンスとジョセフソン接合 (超伝導トンネル接合) からなる非線形共振器回路。この回路では、ジョセフソン接合の非線形性のために、「基底状態と第一励起状態間のエネルギー」と「第一励起状態と第二励起状態間のエネルギー」が異なる。そのため、基底状態と第一励起状態を近似的な量子二準位系として扱うことができ、これを超伝導量子ビット (人工原子) と呼ぶ。とくに、電荷ノイズに強くなるように設計されたものを Transmon と呼び、近年の超伝導量子計算機の研究で中心的な役割を担っている。



典型的なシリコン基板上超伝導量子ビット (Transmon) の写真と等価回路図。左の写真の白い部分はアルミニウム電極である。中心の写真にジョセフソン接合のSEM画像を示す。大きな2つの電極がキャパシタンスになり、電極を結ぶ部分のジョセフソン接合と合わせ、右図の等価回路を成している。