

量子力学を用いる最先端デバイス

「光子の粒子性を利用し盗聴不可能な通信を可能に」 超伝導窒化ニオブ単結晶薄膜形成に 必要不可欠なマグネシア単結晶

独立行政法人情報通信研究機構 未来ICT研究センター
ナノICTグループリーダー 工学博士 王 鎮氏



近年、未来の情報通信技術として、量子力学の原理に基づく量子暗号や量子情報処理などの量子情報通信が注目されている。量子情報通信技術は、現在の情報通信技術である光子の集団(光の波動性)を利用した光通信とは違って、光子の一粒一粒を情報キャリア(光子の粒子性)として利用し、情報を処理・伝送する技術である。これが実用化すれば、量子力学の不確定性原理により物理的に読解不能の暗号通信や瞬時に大量の情報を送れる超高速大容量通信が可能となり、安全・安心な情報通信社会の構築が実現するわけである。

これを實現するには、まず、光子一つを高精度に生成する技術と、その光子を高速・高効率に検出する技術などの確立が不可欠である。この技術開発の最前線で研究に取り組んでいるのが独立行政法人情報通信研究機構(NICT: National Institute of Information and Communications Technology) 神戸研究所・未来ICT研究センター(KARC・神戸市西区岩岡町岩岡588-2)のナノICTグループリーダーの王鎮工学博士(ZHEN WANG Ph.D)である。ナノICTグループは、未来の情報通信技術における技術的・性能的限界の克服及び飛躍的発展の實現をめざし、分子・超伝導体などの新たな材料を用いて、高度な量子制御技術や光子レベルの信号制御技術、未利用周波数帯技術、原子・分子レベルの構

プロフィール

未来ICT研究センター
ナノICTグループ
グループリーダー 工学博士

王 鎮 氏
ZHEN WANG Ph.D

- 1978 中国南京大学物理卒、同年同大学物理系助手
- 1991 長岡技術科学大学大学院工業研究科博士課程修了、工学博士。同年郵政省通信総合研究所入所、現在、独立行政法人情報通信研究機構神戸研究所未来ICT研究センターナノICTグループリーダー。
- 2000 郵政大臣賞受賞



未来 ICT 研究センター

造制御・利用技術などの基盤技術の研究開発を行っている。
注目されるのは、量子情報通信技術において、キーデバイスとして必要不可欠である単一光子検出器を超伝導技術を用いて実現しようとして挑戦している。その中で、検出器の心臓部である検出素子が超伝導窒化ニオブ(NbN)を選択し、また、高品質な窒化ニオブ薄膜を製作する際にマグネシア(単結晶酸化マグネシウム・MgO基板)が使われている点にある。スピントロニクス(TMR素子に代表される)など最先端の分野には必ずといって良いほど、マグネシ

アは登場するのは興味深いといわざるを得ない。

そこで、窒化ニオブの薄膜・デバイス作成技術で世界のトップクラスの王グループリーダーに、量子情報通信が目指すものは何か、そして、何故、マグネシアが材料として利用されるのかを訊いてみることにした。王氏は、1988年中国南京大学物理系卒（マイクロ波物理学）、同年同大学助手1991年長岡技術科学大学大学院博士課程卒、工学博士、同年NICTの前身である郵政省通信総合研究所に入所、現在に至る。2000年には郵政大臣賞を受けている。専門は超伝導デバイス及び高周波・高速回路応用技術に関する研究である。

（取材日・2008年10月15日）

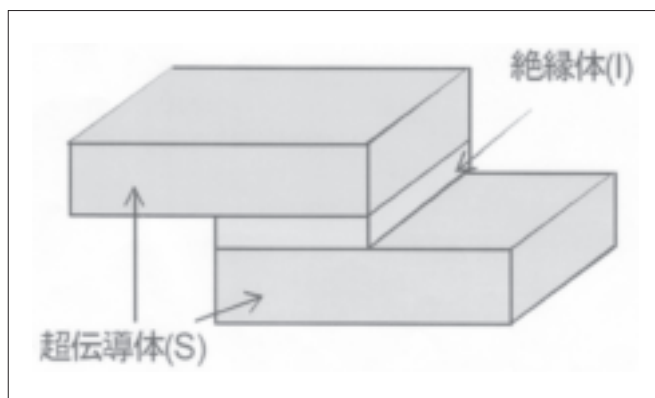
量子情報通信技術とは何か

——王先生のご専門と研究テーマを教えてください。

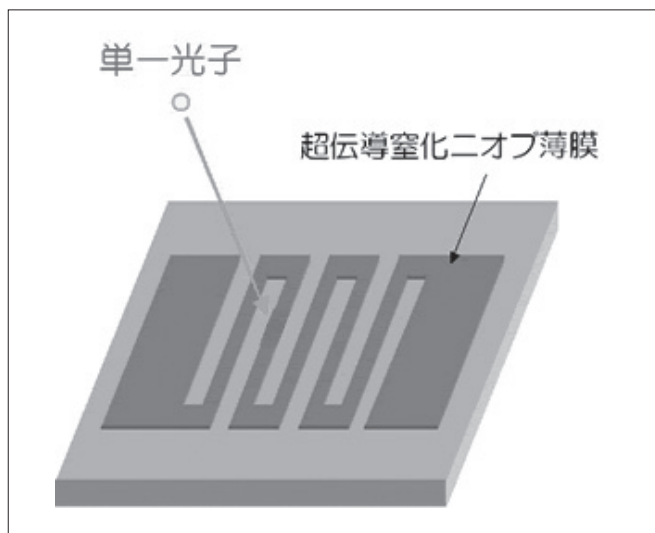


図1 超伝導単一光子検出システム

王・私の専門は超伝導エレクトロニクスであり、現在超伝導デバイスと高周波・高速回路応用技術に関する研究を行っています。そして、ナノICTグループは、次世代ネットワーク技術及び萌芽的な情報通信技術等、高度ネットワークの基盤となる技術の確立を目指しています。ナノICTとは、分子・超伝導体等の新しい材料を用いた未来の情報技術の創出を目的とします。具体的研究内容は、通信波長帯用超伝導単一光子検出器、高感度、低



超伝導 SIS トンネル接合の概念図



超伝導 NbN 単一光子検出素子の動作原理

雑音THz帯電磁波受信機技術、新しい超伝導体ボロンマグネシウム(MgB₂)薄膜、接合などがあげられます。超伝導体のデバイス応用により量子通信・量子暗号通信の実現を目指しています。

——量子情報通信とはどのようなものと捉えれば宜しいでしょうか。

王・情報通信は、21世紀において経済活動や生活、文化など全ての分野に使われる基盤であることはいままでもありません。しかし、年々増加する情報量に対して、より高速の通信速度が求められ、しかもインターネットからの情報漏

洩のないセキュリティの重要性が増しています。そこで、量子情報通信技術は、特に絶対解読不可能な暗号通信（量子暗号通信）が実現できることが理論的に証明されており、未来の通信技術として注目されているわけです。そして、単一光子を情報の担体として利用しているため、現在使われている光ファイバー網を使って長距離な量子暗号通信に有望です。これを

実現するには、光を一粒の光子発生する装置やその光子を1粒子捕まえる装置、単一光子検出器が必要不可欠です。

——レーザダイオードの発光素子、受光素子に変わるものと考えればよいでしょうか。

王・現在の光子の集団、光の波動性を利用した光通信とは違って、光子の一粒一粒を情報キャリア、光の粒子性として利用するわけです。

——単一光子検出器とはどのようなものですか。

王・単一光子を検出するには、高速・低雑音の検出器が必要です。ところが、現在市販されている光子検出器はアバランシェ・フォト

ダイオード(APDとも呼ばれる)が用いられていますが、アフターパルスと呼ばれる現象によって、現在、動作速度は数メガヘルツ(MHz)に制限されています。一方、超伝導単一光子検出器(SSPD)は、原理的に数十MHzまで高速、かつ低雑音動作が可能であるため、量子暗号通信用単一光子検出器として最も期待されています。そこで、我々は超伝導単一光子検出器と小型冷凍機を用いた検出システムを独自に開発し、性能とし

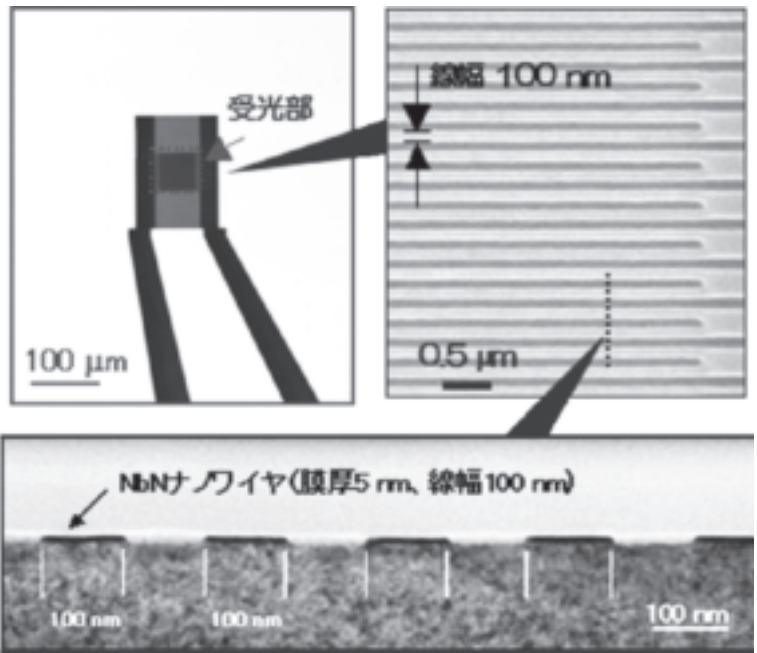


図2 窒化ニオブ(NbN)ナノワイヤ検出素子

て動作速度50 MHz、検出効率3%、暗計数率100など、世界最高のシステム性能を達成しました。開発したシステムは超伝導薄膜検出素子と光ファイバーを実装した超伝導検出パッケージと100V、15Aで駆動可能な小型冷凍機により構成されています。実用化に向けた小型化と可搬性を実現

素子は厚さ5ナノメートル以下、幅100ナノメートルです。

※(NICT2008年9月30日記者発表)

窒化ニオブを 薄膜材料に選択

—— 検出の仕組みは。

王・超伝導は超伝導転移温度以下で電気抵抗が0になります。この時、超伝導中の電子はペアを作っています。超伝導のキャリアとして働いていますが、この電子ペアは一定

の値(エネルギーギャップと呼ばれる材料固有の値)以上のエネルギーによって破壊され、超伝導性を示さない励起電子となります。

1550 nmの通信波長帯の光子一粒のエネルギーは、超伝導のエネルギーギャップよりも十分大きいので、光子一つが超伝導に入射されると超伝導中のペアが破壊されて常伝導状態の領域(ホットスポットと呼ばれるもの)が発生します。発生したホットスポットは非常に小さいので、そのまま検出することは難しいのですが、超伝導を極めて細い線路上に加工してやれば、発生したホットスポットの抵抗変化を読み取ることが可能になります。これは、例えば太いホース中に砂粒一粒が入っても水の流れに影響を与えませんが、ホースがどんどん細くなれば水は流れ難くなり砂粒が入っていることが、認識されることが同じです。但し、超伝導光子検出器の場合、薄さ数ナノメートル、幅数十ナノメートル程度に加工してやらなければなりませんので、大変困難を伴う技術です。従って、単一光子を高速、かつ効率良く検出するためには、高品質超伝導薄膜の作成とナノワイヤ微細加工技術が必要不可欠です。

そこで、我々は化合物系超伝導

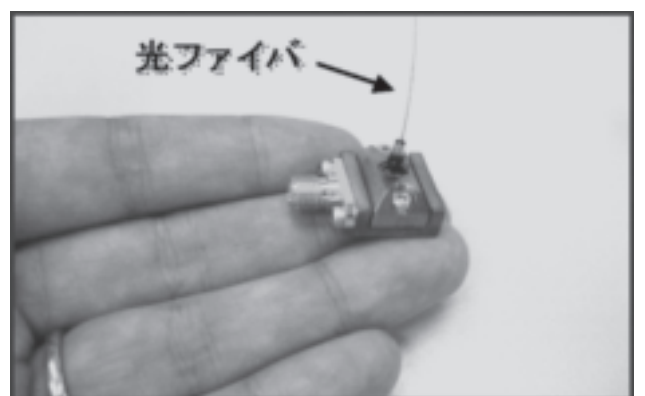


図3 検出器パッケージ

体窒化ニオブを薄膜材料として素子作成技術の開発を進め、世界最高レベルの薄膜作成に成功しています。現在、膜厚約4 nm(ナノメートル)、線幅100 nm(ナノメートル)までの極微細化加工のレベルに達しています。ちなみに、素子作製プロセスは、全てクリーンルーム内で行われ、超伝導薄膜成膜用スパッタ装置や電子線描画装置等を用いています。

—— 既に量子暗号配送実験への応用に成功していますね。

王・NICTは昨年(2007年)、NECや米国NISTとの共同研究により超伝導単一光子検出器を用いて都市圏敷設の光ファ

独立行政法人情報通信研究機構 神戸研究所(KARC)

設立から20年の歩み

◆20年史(沿革)

1989年	関西支所設立(通信総合研究所) 知覚機構、知識処理、超伝導、コヒーレンスの4研究室を新設
1990年	知的機能、電磁波分光研究室の新設
1991年	生体物性、生物情報研究室の新設 第一研究棟の完成、関西における本格的な研究活動の開始
1993年	ナノ機構研究室の新設 情報系3研究室、物性系3研究室・1特別研究室 およびバイオ系3研究室体制となる
1994年	5周年記念式典 第二研究棟(生物棟)、厚生棟、工作棟などの竣工
1995年	阪神淡路大震災
1996年	クリーンルーム棟、APII棟の竣工
1998年	第三研究棟(脳機能研究棟)の竣工 脳機能研究Gが移転、結集プロジェクトなどを新設
1999年	10周年記念式典
2000年	情報系3研究室が、けいはんな情報通信融合研究センター (現 けいはんな研究所 知識創成コミュニケーション研究センター)へ移転する
2001年1月	郵政省が総務省に再編
2001年3月	第四研究棟の竣工
2001年4月	独立行政法人 通信総合研究所 関西先端研究センターとなる 超伝導、ナノ機構、生体物性、生物情報、脳機能、 レーザー新機能 等の研究室となる
2004年4月	独立行政法人 情報通信研究機構 関西先端研究センターとなる
2006年4月	独立行政法人 情報通信研究機構 未来ICT研究センターとなる 各研究室をナノICTグループ、バイオICTグループに再編
2008年4月	独立行政法人 情報通信研究機構 神戸研究所 未来ICT研究センターとなる

MgOはエピ成長に 必要不可欠な材料

——では、窒化ニオブ薄膜形成とマグネシアの関わりをお聞かせ下さい。

王・窒化ニオブの研究は大学院の時代から取り組んでいました。MgOは窒化ニオブと同じ結晶構造を有しており、格子のミスフィットはわずか5%であるため、窒化ニオブのエピタキシャル成長にMgOが基板として使えることは1970年代から分っていました。

しかし、当時単結晶MgOが大変高価であり、基板の質もあまりよくなかった。当時はシリコン基盤にMgOでバッファを引いて、その上に窒化ニオブ膜を形成するなどしていました。91年KARCに来てからは、MgO単結晶基板を使っています。

——何故、MgOが使われるのでしょうか。

王・窒化ニオブ薄膜の超伝導特性はその結晶性を強く依存しています。窒化ニオブ薄膜の品質を高めるためには、その結晶性つまり単結晶な薄膜を作製する必要があります。先に述べたように、窒化ニオブの結晶構造が立方晶でMgO単結晶と同じですので、単結晶窒化ニオブ薄膜を作成するには、MgO単結晶基板を用いて窒化ニオブ

イバー回線(けいはんなオーブンラボから奈良の大安寺間16km3往復で97km)を使って、世界最長、最高速量子暗号鍵配送に成功しました。

——着々と実用化に向かっていくわけですね。

王・量子暗号の研究は、これまで

で殆んどが実験室内の理想的な空間で行われていましたが、今回の実験は道路沿いに設置された光ファイバーを用いてフィールド実験を実施、成功したわけです。今後、実用化にあたっては暗号システムの動作を更に安定させ、鍵生成速度をさらに向上させる必要があります。

ます。超伝導単一光子検出器は量子暗号通信応用だけではなく、量子光学、光子計数器、低エネルギー粒子検出器、質量分析、単一光子イメージング、宇宙工学など様々な分野への応用も広がっています。

をエピタキシャル成長させる方法が一番よいのです。従って、高品質窒化ニオブ薄膜を作成するためにはどうしても品質の高いMgO単結晶基板が必要になってきます。

——MgO単結晶でなければならぬわけですね。

王・窒化ニオブ薄膜のエピタキシャル成長にとっては非常に重要です。ですから、実用化のために我々は、MgO基板加工技術も開発して来ました。例えば、高周波デバイスに不利と言われたMgO基板を導波管で使えるために基板を薄く研磨する技術も開発しました。その結果、MgO基板が使い難いと言われていた高周波デバイス分野で前例のない研究成果も出ています。使い難い材料を克服するのも僕らの仕事です。MgOは窒化ニオブの性能を最大限に引き出せるから。

——研磨レベルは。

王・基板の厚さが25μm以下薄くすることは可能です。デバイスを形成して裏から削ります。

——MgO単結晶基板は硬いのですか。

王・大変硬い。基板の結晶性も毎回変わります。ロットごとに基板の性質が異なりますが、その都度、我々の研究室で最終的なチェックをする必要があります。例えば、

このロットは単結晶の反りが大きい、割れ易い、あるいは、このロットは結晶性がいいというように、安定性に欠けるところがあります。なかなか把握しにくいファクターはありますので、タテホ化学さんで解決していただければ嬉しいのですが(笑)。まあ、完璧な単結晶はあり得ないのですがね。

——繰り返しになりますが、窒化ニオブ薄膜形成にはMgO単結晶が必要不可欠であるわけですね。

王・窒化ニオブのエピタキシャル成長には、現在の成膜方法においてMgO基板を使用するのは一番いいのです。単結晶基板の大きさは2インチで十分です。但し、フレキシブルな基板が必要です。

——ちなみに、素子の作製技術は。

王・素子作製は全てクリーンルーム内で行われ、超伝導薄膜成膜用反応性RF・DCスパッタ装置やリソグラフィ用電子線描画装置(EB)等を用いています。

——最後にタテホ化学に対する要望をお聞かせ下さい。

王・やはり、より高品質でかつ安定しているMgO単結晶基板を作って欲しいですね。もちろん、コスト面でも努力して頂きたい。

State of the art devices using quantum mechanics Magnesium single crystals are indispensable for the formation of superconductive nitride niobium single crystal thin film

NITC Kobe Advanced ICT Research Center
Nano ICT Group Leader Zhen Wang, Ph.D

Quantum information using quantum cryptography and quantum information processing is attracting note as a new state of the art device. This is a technology which uses each photon particle as an information carrier, and processes and transmits energy. Zhen Wang Ph. D., the leader of the nano ICT group at the Kobe Advanced ICT Research Center of the NICT (National Institute of Information and Communications Technology) is furthest ahead in the involvement of this technology. Dr. Wang, using new material such as superconductors, is undertaking development of high level quantum control as well as signal control technology and end use wave bands at the photon level, as well as structural control and application technology at the nuclear and particle levels. The key device for quantum information is the single photon detector, and he is tackling this using superconductivity. He has selected superconductive NbN for the detection element which is the core of the detector. When making a high quality NbN thin film, what is of note is that a single crystal MgO substrate is required.

The Dr. Wang group has been moving ahead with development of technology for the formation of elements with compound superconductive NbN as the thin film material and has succeeded in producing the world's highest level thin film with a thickness of 4nm and a line width of 100nm. Here too, a high quality MgO single crystal substrate is used which has crystalline qualities just as NbN. This is because that making the NbN grown by epitaxy on this substrate is the best way. In addition, they are undertaking various steps for bringing about practical application, such as testing of quantum cryptography transmission.