

世界初！商用周波数帯での光パルス駆動型交流標準電圧装置の開発に成功

— 科学的に保証できる電圧波形が容易に作れます —

平成21年6月12日

財団法人国際超電導産業技術研究センター

■ ポイント ■

- ・ 商用周波数から数十キロヘルツまでの交流標準電圧波形を発生できる装置を開発
- ・ 交流電圧標準などの電気標準、基準信号源、計測器の校正など多様な応用が可能
- ・ 光パルス駆動により実用レベルの電圧発生と遠隔操作を実現

■ 概要 ■

財団法人 国際超電導産業技術研究センター【理事長 荒木 浩】(以下ISTECという) 超電導工学研究所、独立行政法人 産業技術総合研究所【理事長 野間口 有】(以下「産総研」という) 計測標準研究部門、エレクトロニクス研究部門、東京都市大学【学長 中村 英夫】 工学部生体医工学科 桐生 昭吾教授は共同で、家庭用電源(商用電源)から数十キロヘルツの広い周波数範囲に及ぶ任意交流波形の量子化電圧信号が発生可能な交流標準電圧発生装置の開発に世界で初めて成功しました。本開発の一部はNEDO「次世代高効率ネットワークデバイス技術開発」事業の成果です。

今回の成果は、超電導デジタル回路用にNEDOの支援を受けてISTECが開発した光入力ポート付き高周波極低温ローパスシステムと、産総研と東京都市大学が共同で開発した交流標準電圧源を統合することにより、任意の交流波形を量子力学に基づく精度(=現在の科学で到達しうる最高精度)で発生できる標準電圧源を、扱いやすく汎用性の高い装置として実現したものです。この装置では、作りたい波形に対応するデジタルデータを用いて光パルス列を作り、そのパルス列を低温中のフォトディテクタを介して電流パルスに変換します。その電流パルスをジョセフソン素子で構成した量子化器に入力することにより、所望の量子化電圧波形を得ることに成功しました。

この装置により発生する電圧は、温度、湿度、気圧などの環境変動によらず、また経時変化もないため校正不要な標準電圧です。光パルス列発生部と、標準電圧を生成する量子化器は光ファイバーで接続されているため、それらを距離を隔てて設置し、標準電圧を遠隔発生させることも可能となります。また、商用電源で駆動可能であるため、装置の設置条件に高い柔軟性があります。この装置を用いれば、特別な知識のない人でも量子力学に基づく標準電圧を容易に発生させることができます。

今回開発した交流標準電圧発生装置は、現在直流の電圧標準を基準にして複雑な校正ルートを経由して供給されている交流電流量を直接発生できるため、交流全般の標準に発展していくことが期待されているだけでなく、様々な応用展開が可能です。

本技術開発の詳細は、2009年6月16日より九州大学で開催される国際超電導エレクトロニクス会議2009(International Superconductive Electronics Conference 2009)で発表する予定です。

____は別紙【用語の説明】参照

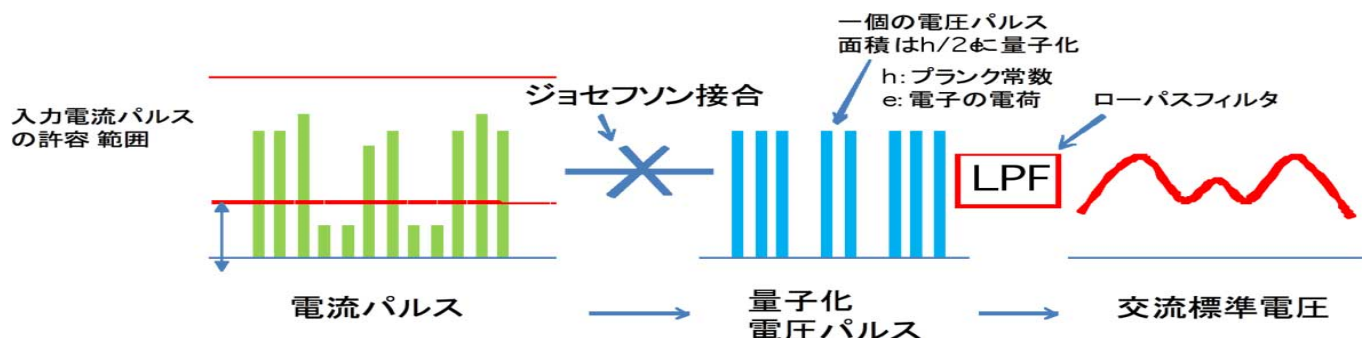


図1. パルス駆動型量子化器による交流標準電圧発生原理

■動作原理■

図1にパルス駆動型量子化器による交流標準電圧の発生原理を示します。ジョセフソン接合に電流パルスが入力されると、そのパルス高が一定範囲にある場合は、量子化された電圧パルスが出力されます。量子化された電圧パルスとは、その積分値が“常に”、“正確に” $h/2e$ となるパルス状の電圧のことです。ここで h はプランク常数、 e は電子の電荷とともに物理常数であり、正確に定義された量です。高精度のローパスフィルタを用いて、この量子化された電圧パルスをなまらせて重ね合わせると、入力された電流パルスの密度に応じた電圧波形を発生することができます。この出力電圧は量子化された電圧パルスを重ね合わせたものであるため、各時刻における電圧値は科学的に値が保障された交流の標準電圧となります。

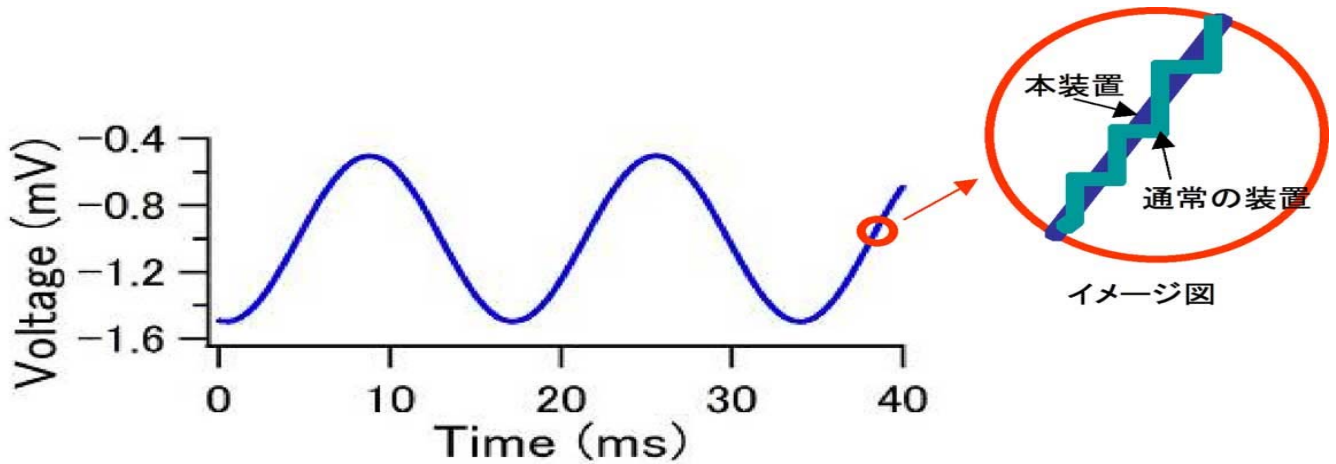


図2、本装置で発生した59.509Hzの正弦交流電圧

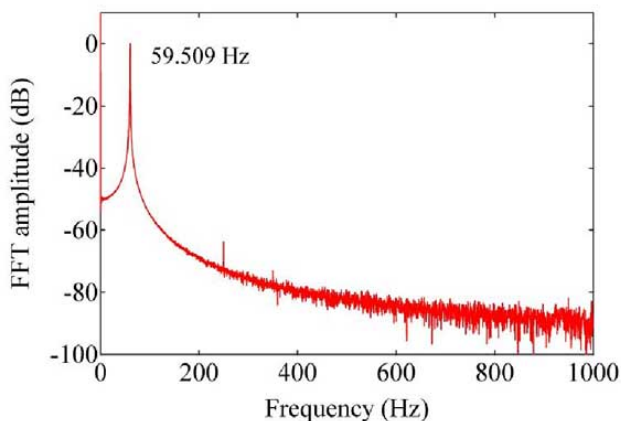


図3、図2波形の周波数成分

■研究の内容■

図2は本装置で発生した59.509Hzの正弦交流電圧です。一見すると何の変哲もない正弦波に見えますが、各時刻における電圧は量子力学で定義された極めて精度の高い値になっています。例えば縦軸を100万倍に拡大したとしても滑らかな正弦波形からずれることはありません。図3は図2波形の周波数成分を測定したものです。測定器のノイズを除けば、単一の周波数しか含まない純粋な波形であることが示されています。このように本装置で発生された電圧は、電圧軸における値が正確だけでなく、時間軸における精度も極めて高いものになっています。本装置は図2に示されるような規則的な正弦波だけでなく、商用周波数(50Hz、60Hz)から数10kHzまでの任意の交流波形を発生させることもできます。

このような標準電圧を発生する本装置の仕組みを図4に示します。まず、作りたい波形のデジタルパルスデータをコンピュータ上で作成します。このデジタルパルスデータに対応した光パルス列を生成し、光ファイバを用いて低温中(冷凍器中)に置かれたフォトディテクタに入力することにより電流パルス列に変換します。その電流パルス列を、ジョセフソン素子からなるパルス駆動型量子化器に入力すると、対応した量子化電圧パルス列を発生できます。その出力をジョセフソン接合同じ回路上に置かれたローパスフィルタを介し出力することで、希望した任意波形の標準電圧が出力されます。ここで、光パルス列を生成するための光変調方式は産総研が新たに考案したものです(特許出願中(浦野・丸山))。このように本装置

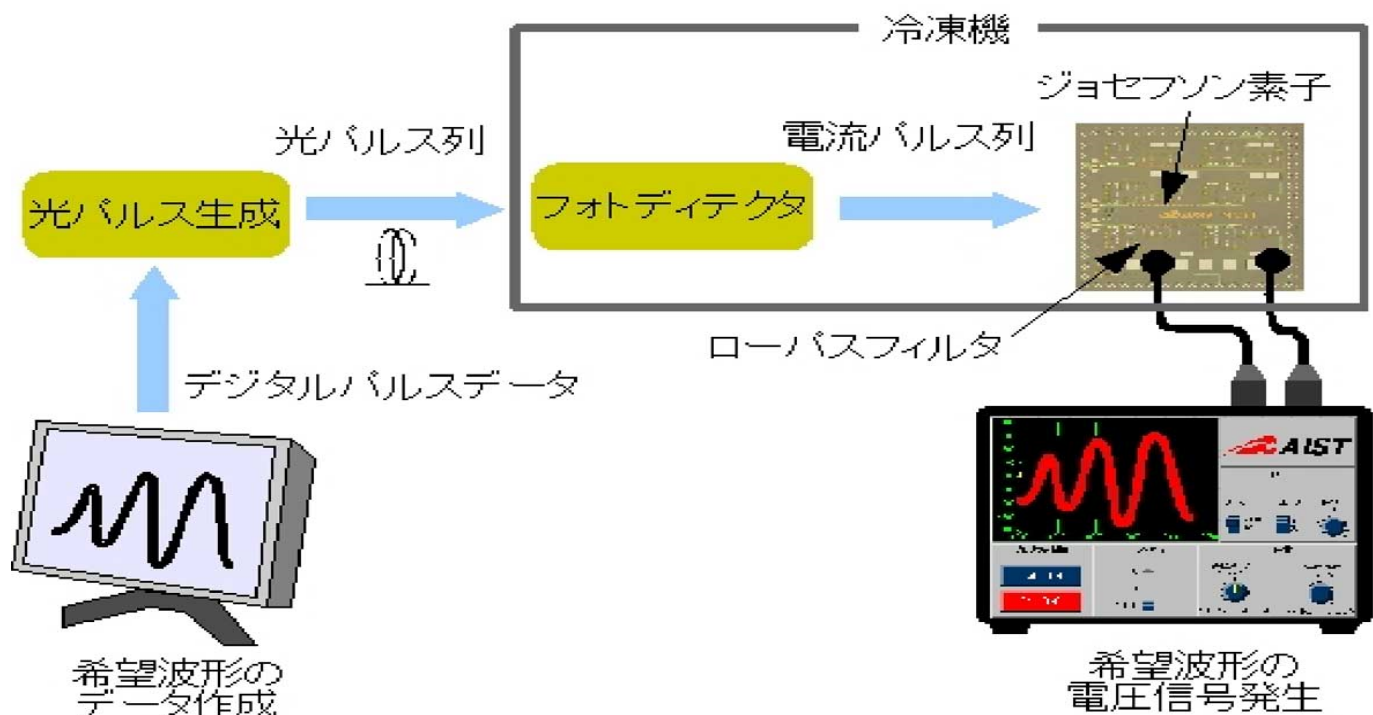


図4. 交流標準電圧発生の仕組み

で発生した量子化電圧は物理定数で値が決まっているため経時変化がなく校正不要です。また、冷凍機で冷却することで素子まわりの環境が安定するため、温度、湿度、気圧などの面倒な環境管理も不要になります。

■開発の社会的背景■

計量標準は、ほぼ全ての産業の基盤となる計測の整合性を、科学的に保証するものです。1メートルや1キログラムという値が世界中どこでも意味を持つのは、標準によってそれらの値が世界中どこでも同じになることが科学的に保証されているからです。製品の国際競争力を高め、国民生活の安心・安全の根拠となる各種測定結果を信頼性のあるものにするためには、そこに使われている各種の値が標準によって十分に定義されている必要があります。例えば、情報通信、半導体、家電、自動車、電力等の産業界では、製品の設計開発あるいは品質の管理に、高安定な電圧標準が不可欠であり、これを利用することにより、グローバルな部品調達、国際規格への適合が可能となります。現在、直流電圧の標準は**国家標準**であるジョセフソン直流電圧標準を起点に供給されています。

企業現場で使われている半導体をベースとした小型の標準直流電圧発生器は時間の経過に伴って発生電圧が変動するため、少なくとも1年に1回は国家標準による校正を受けなければ精度を保証できません。この校正には1台あたり数十万円の費用がかかる上、校正期間中は標準器として使用できず、海外に事業所をもつ企業の場合には、校正のための日本への輸送、通関の手続き等、コスト・利便性の面で様々な問題があります。また、このような管理に様々な困難がある標準電圧発生器は、直流電圧しか発生出来ません。企業の生産・計測現場では、実際には交流信号が一般的に用いられており、直流電圧標準がそれらの広範な交流測定用機器の校正に利用されています。その交流電気量の校正は様々な仮定を含み、被測定装置本来の性能が正しく評価されていない恐れがあります。また、校正は直流電圧のみで行われているため、時間情報を含む電圧波形などに関しては従来の標準は殆ど無力でした。このような事情により、校正不要でかつ交流信号を直接発生できる標準電圧源があれば、これらの諸問題を根本的に解決できると考えられています。

しかし、校正不要であり、国家標準にも利用されている従来型のジョセフソン直流電圧標準は原理的に交流発生が不可能です。この問題を解決するには、従来とは異なる、交流の標準電圧を発生させる駆動システムと、その高速駆動に対応できるジョセフソン素子を開発する必要性がありました。交流電圧標準はその需要の大きさから世界的に開発が盛んに進められてきましたが、商用電源(50Hz、60Hz)を含む広範囲の周波数帯域での成功例は今までありませんでした。

■研究の経緯■

産総研は武蔵工業大学(現東京都市大学)と共同で、交流測定用機器などを直接校正できる、汎用量子電圧発生器の開発を2005年より行ってきました。まず動作を確認するために、50 MHzの光パルスを利用した液体ヘリウム中での実験を行い、マイクロボルトレベルの直流電圧発生に成功することができました。しかし、光パルスの周波数を上げること、この目的に適したジョセフソン素子の集積度を高めることが容易ではなかったため、発生電圧が実用に使うには低すぎるという問題点がありました。また、液体ヘリウムを取り扱う不便さのため、汎用的に使われる装置とは言い難いものでした。

一方、ISTECは2007年に開始されたNEDO「次世代高効率ネットワークデバイス開発」事業において、冷凍機で冷却された超電導回路に光ファイバを用いて高速(～40Gb/秒)でデジタル信号を入力する技術を開発してきました。また、ISTECでは超電導アナログーデジタル変換器(ADC)の動作を正しく評価するための信号源を求めていました。

そこで、2008年にISTECと産総研は、このNEDO事業の中で、ISTECが開発する超電導ADCを評価するための標準電圧源として本装置を開発する共同研究を開始しました。

本研究では、産総研との共同研究開始を契機に、デジタル信号処理用に開発された高速光パルス発生(40 Gb/秒)と光変調技術および高周波極低温プローブシステムを交流標準電圧発生装置に転用しました。その結果、上記の技術的困難を解決し、商用周波数から数十キロヘルツに及ぶ帯域で数十ミリボルトの交流標準電圧信号を発生できる装置の開発に成功しました。従来は、このような技術を標準の分野で利用することは想定されておらず、異分野技術の融合によるブレークスルーでした。さらに、産総研エレクトロニクス研究部門で開発していた高い集積化が可能なNbN/TiNx/NbNジョセフソン素子から成るアレー(集積度1600以上)を今回の開発に利用することが技術的に可能となり、光パルス周波数の高速化と相まって出力電圧値の大幅な増大が実現しました。また、この共同研究の中でISTECが試作したNb/AIOx/Al/AIOx/Nb ジョセフソン素子も高い集積度で作製する見通しが得られ、その特徴を生かした利用が検討されています。

■ 今後の予定 ■

研究グループでは、今後、本装置に対し、周波数帯の拡張、電圧値の増幅を行い、より生産現場で利用しやすい標準電圧源として整備することを予定しています。本装置は冷凍機を用いているため商用電源だけで動かすことができ、信号の遠隔発生も可能であるなど設置の融通性が高いことが特徴です。将来は国家標準の供給のみでなく、実際に生産現場で校正不要な標準電圧源としても利用可能です。具体的には、オシロスコープや基準波形発生器など産業界で使用されている機器の超高精度校正を行うことができます。

任意波形として「雑音」を発生させれば、標準雑音源としても利用可能です。また、この雑音を使って、次世代の温度標準に展開することもできます。また電圧レベルを高精度に定義できるので、高周波減衰量の基準としての応用も考えられます。さらに、交流電子電流源、任意値インピーダンス標準の開発などにもつながっていきます。

また、ADCの校正も可能であり、多数の性能のそろったADCやデジタルーアナログ変換器(DAC)を同時に使用する医療現場や加速器を利用したビッグサイエンスなどへの応用も期待できます。

以上のように幅広い産業応用が期待できる技術であり、今後ニーズ調査をしつつ適用範囲を拡張し、商品化・標準供給を行っていく予定です。

■ 本件問い合わせ先 ■

財団法人国際超電導産業技術研究センター

超電導工学研究所 デバイス研究開発部 低温デバイス開発室

室長 日高 睦夫 〒135-0062 東京都江東区東雲1-10-13

TEL: 03-3536-5712、029-861-5055 FAX: 03-3536-5705

E-mail: hidaka@@@istec.or.jp (送信時は@@を取ってください)

【用語の説明】

◆量子化電圧

ジョセフソン素子と呼ばれる超電導素子に電流パルスを印加すると、素子の両端に、量子力学に出てくる基本的な定数であるプランク定数と電子の電荷(電気素量)によって決まる量子化された電圧パルスが現れる。これを量子化電圧という。パ

ルスの単位時間当たりの個数を制御することにより、任意の量子化電圧波形を発生させることもできる。これらの電圧は、ジョセフソン素子に使われている材料や、素子の構造、寸法、温度等に依存しない。素子の構造と駆動方式は異なるが、同様の素子を用いたジョセフソン直流電圧標準は現在国家標準として利用されている。ジョセフソン素子による直流量子化電圧は、国際的に1990年より従来の標準電池に代わり、1 Vおよび10 Vの標準電圧を発生させるための基準電圧として採用された。

◆高周波極低温プローブシステム

容易な素子のマウント・測定を可能とするための高周波プローバ型の素子ホルダを備えた冷凍機システム。

本開発で用いたものは、液体ヘリウムを用いないため容易な運用が可能な冷凍機を用い、高周波測定のため光入力ポートを含む32本の入出力ポートを備えている。室温から低温部までの配線長も液体ヘリウムを用いたシステムの3分の1程度と短くなっているため、高周波特性に優れている。

◆ジョセフソン素子

二つの超電導体を弱く結合した素子。結合の方法により様々な種類があるが、本研究では、超電導体の間に常電導体を挟んだSNS型、もしくは常電導体の両側に絶縁体を置いた構造を挟んだSINIS型が用いられている。

◆量子化器

入ってきた電流パルスをその電流値に応じて量子化された(つまり量子力学的に離散化された)電圧に変換する素子。直列に配列させたジョセフソン素子とその素子列に電流パルスを入力する端子、量子化電圧を取り出す端子からなる。

◆ローパスフィルタ

高い周波数成分の信号を抑制し、特定の周波数以下の周波数の信号を通過させるフィルタ。

◆冷凍機

液体窒素や液体ヘリウムなど高価で取り扱いに注意を要する寒剤を必要とせず、電源スイッチを入れるだけで動作する冷凍機。

本開発では最低温度が4 K(マイナス269°C)の汎用冷凍機を利用している。

◆国家標準

計量法で指定される日本の最高位の計量標準器の総称。正確には「特定標準器」という。電圧だけでなく、長さや重さなど各種物理量について特定標準器が指定されており、その大部分は産業技術総合研究所が所有し、維持・管理している。

◆光変調

レーザ光をON/OFFさせることで、パルス状のレーザ光を発生させること。データ通信に汎用的に用いられている。

本開発で用いた高速動作・長距離伝送が可能な変調器の場合、データの0と1の比率が1:1から大きくずれると誤動作を起こすが、本開発では任意データを送るための技術も考案した。

◆NbN/TiNx/NbNジョセフソン素子

産総研で独自に開発された窒化ニオブ(NbN)超電導薄膜を電極とするジョセフソン素子。Siウエーハ上にNbN膜(300nm)、窒化チタン(TiNx)金属膜(30nm)、NbN(300nm)膜の順に堆積させることによって作製する。膜の構造から、SNS(Sは超電導、Nは常電導金属を示す)素子と呼ばれるものの一種。この素子は電流パルスによる量子化電圧の発生(パルス駆動と呼ばれる駆動方式)を可能とする。NbN膜は約16 K(マイナス257°C)の超電導臨界温度(T_c)を有することから、比較的小型の冷凍機によって得られる10 K付近の温度において動作させることもできる。本開発で作製した一つのNbN/TiNx/NbNジョセフソン素子の大きさは、一辺が2-4 mmの正方形。

◆Nb/AIOx/Al/AIOx/Nb ジョセフソン素子

ニオブ(Nb)超電導薄膜を電極とするジョセフソン素子。Siウエーハ上にNb金属膜、酸化アルミニウム(AIOx)絶縁体膜、アルミニウム(Al)金属膜、AIOx絶縁体膜、Nb金属膜の順に堆積させることによって作製する。膜の構造から、SINIS(Iは絶縁体を示す)素子と呼ばれる。SINIS素子は基本的にはSNS素子と同様の振る舞いをする。この素子は、電流パルスによる量子化電圧の発生(パルス駆動と呼ばれる駆動方式)を可能とする。本開発で作製した一つのNb/AIOx/Al/AIOx/Nbジョセフソン素子の大きさは、一辺が38 mm × 12 mm長方形。