

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 高梨 直人

光量子計算が原理実証段階を超え実用化されていくためには回路の小型集積化が必要である。時間領域多重連続量量子計算の場合、その回路はスクイーズド光源、線形光学回路、測定フィードフォワード部の3部分からなり、回路の大きさの殆どを占めるのは線形光学回路部分である。その線形光学回路部分の中でも、波束モードのタイミングをシフトさせるための遅延路は、波束モードを複数個格納できるサイズである必要があり、小型集積化のボトルネックとなっている。波束モードのサイズはスクイーズド光源や測定部の帯域で決まるものであり、したがって線形光学回路の小型集積化を実現するためには、これらの部分の広帯域化が必要となる。光を用いた量子計算は光の周波数レベルの高速な計算速度を実現できるポテンシャルを有している。これを発揮していくためには量子計算回路の各部の帯域を広げていく必要がある。線形光学素子に関しては数十ナノメートル程度の波長幅に対応するビームスプリッタ等も既に多く存在し、これは周波数に換算すれば数テラヘルツもの広帯域性を有していることを意味する。しかしながら、スクイーズド光源に関してはこれまで高レベルかつ広帯域のものは存在せず、また測定フィードフォワード部に関してはさらに狭い帯域に留まっていた。

そこで論文提出者はまず、従来からスクイーズド光発生に使用されている光パラメトリック発振器(OPO)の帯域が共振器サイズにより制約されることに注目し、セミモノリシック型の小型なOPOを製作した。またこのOPOには集積化された線形光学回路との接続性が高くなるように特殊な構造が採用された。具体的には共振器を構成する2枚のミラーのうち一方を結晶の平面端面上のコーティングに置き換えることにより、導波路素子との直接結合が原理的に可能とされている。このOPOでは低周波での6dBのスクイーディングと、100MHzでの3dBのスクイーディングが確認された。

次に論文提出者はさらなるスクイーズド光の広帯域化のため、共振器構造を用いない方式のスクイーズド光源の開発に取り組んだ。パラメトリック増幅器(OPA)を用いるこの方式では、共振器による増強作用がないため従来高レベルのスクイーディングが得られていなかった。そこで論文提出者は非線形光学素子として高効率なシングルモードニオブ酸リチウム導波路を採用した。論文提出者はファイバクロズドのスクイーズド光源評価系を設計製作し、この評価系で前述の導波路からのスクイーズド光を測定することにより4dBのスクイーディングレベルを得た。このスクイーズド光の帯域は測定器の帯域を上回っており直接測定することができなかつたため分光に基づき推定され、その推定された帯域は数テラヘルツ程度であった。

最後に論文提出者は測定部分の広帯域化に取り組んだ。電気回路を用いる方式では帯域が電気回路の応答速度で制限されてしまうため、ここでは従来の電気式の光

検出器での位相敏感測定の代わりに、光パラメトリック増幅によって光学的に一方の直交位相振幅の情報を選択的に取り出す手法が採用された。この手法はこれまで理論提案や原理実証がなされてきていたが、この手法で高レベルのスクイーズド光を測定するために求められる高性能な OPA の実現は従来難しかった。論文提出者は先の研究で開発したニオブ酸リチウム導波路を用いたスクイーズド光源がこの測定法で必要となる高い増幅率などの性能を有していることに着目し、これを用いた全光学的位相敏感測定を行った。被測定光としては別のニオブ酸リチウム導波路から得られるスクイーズド光が使用された。結果、3dB のスクイージングレベルが 3THz に渡って測定された。また、この測定によりテラヘルツ級の広帯域な測定においては光ファイバの分散が問題となりうることが明らかとなった。そこで論文提出者はこの分散を打ち消す寸法の分散補償ファイバケーブルを設計し、これを測定系に組み込むことによりスクイーズド光の分散補償を実証した。この結果スクイーズド光の位相は 1THz に渡って保持されるようになった。

本論文の構成は次の通りである。まず、第 1 章にて序論として研究背景と研究の位置づけを述べ、次の第 2 章では量子光学実験の、第 3 章では非線形光学効果の、第 4 章では導波光学の基礎事項を説明している。第 5 章では導波路素子との直接結合性を有した OPO の開発について、第 6 章および第 7 章ではニオブ酸リチウム導波路 OPA を用いたスクイーズド光発生の実験について述べている。第 8 章では OPA を測定応用する理論である SU(1,1) 干渉計についての基礎事項を説明している。第 9 章および第 10 章ではニオブ酸リチウム導波路 OPA を用いた全光学的位相敏感測定の実験について述べている。第 11 章では、線形光学回路の集積化の一例として論文提出者がこれまでに従事した線形光学回路設計が紹介されている。第 12 章では上記の内容を総括し今後の展望が考察されている。加えて付録 A では今後の導波路の改良に有用と思われる理論的考察が示されている。また、付録 B ではニオブ酸リチウム導波路の製法について紹介されている。付録 C では論文提出者の出版・発表目録が示されている。

以上のように論文提出者はこれまで量子計算回路の導波路素子への小型集積化と高速化を阻んでいたスクイーズド光源と測定部の帯域の向上に取り組み、それぞれについてテラヘルツ級の広帯域性を実現することに成功した。テラヘルツ級の広帯域性により波束モードのサイズは数百マイクロン程度にまで短縮され、導波路上への光回路の集積化が可能となる。さらにこの手法が全光学的テレポーテーションのような光学的なフィードフォワード手法と組み合わせられることによりテラヘルツ級の繰り返し周波数を有する高速量子計算が可能となると考えられ、集積回路上での高速量子計算の実現に向けて本研究は非常に重要な意義を有すると認められる。

したがって、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。