

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	平岡 友基
論文題目	Nonlinear Response of Resonant-Tunneling-Diode Terahertz Oscillator (共鳴トンネルダイオードテラヘルツ発振器における非線形応答)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>共鳴トンネルダイオード (RTD) 発振器は、半導体量子井戸構造における共鳴トンネル効果により得られる微分負性コンダクタンスを利用した電氣的な自律発振器である。RTDにおいては、共鳴トンネル系に特有の量子効果が重要となるダイナミクスが存在することが期待される。例えば、テラヘルツ周波数帯におけるRTDの検出器動作においては、強い光電場によって量子井戸の共鳴トンネル特性が変化する現象 (光アシストトンネリング) を利用していることが知られている。一方、RTDテラヘルツ発振器の研究においては、自由発振状態の発振周波数とパワーが主に注目されてきており、量子効果の役割は定かでない。本論文では、自律振動子の個別の性質が周期駆動力や時間遅れフィードバック、ノイズといった駆動力に対する応答として現れることに着目して、RTDテラヘルツ発振器の注入同期と光フィードバックに対する非線形応答特性を調べた。</p> <p>まず、RTD発振器からのテラヘルツ光のスペクトルや位相を精密計測するために、ヘテロダイン計測システムを構築した。光周波数コムを利用した標準テラヘルツ光発生と計測システムからの戻り光を排除するためのアイソレータを開発した結果、周波数分解能 120 mHz、帯域幅 10 GHzでのスペクトル計測と時間分解能 100 psのヘテロダイン時間波形計測が可能となった。</p> <p>次に、開発したヘテロダイン計測システムを用いてRTDテラヘルツ発振器の注入同期現象を詳しく調べた。注入同期が起きる周波数範囲であるロッキングレンジは注入強度依存性に対して、線形に振舞うことがわかった。この特性は、弱い非線形性を有する振動子に適用可能なAdlerモデルにより定性的に理解できることがわかった。また、低強度での注入において、ロッキングレンジが自由発振状態を支配しているノイズ幅と同程度になった時、注入同期が安定化することを実験的に示した。また、バイアス電圧によっては、Adlerモデルでは説明できない非対称なロッキングレンジが現れることを明らかにした。回路シミュレーションから、RTDの非線形キャパシタンスがその原因となりうることを示した。</p> <p>さらに、RTDテラヘルツ発振器の光フィードバックに対する応答を調べた。その結果、光フィードバックによって複数の光学モードが生じ、それらがモード同期することを発見した。モード同期状態における電場の時間波形は周波数変調的であることがわかった。このメカニズムを理解するために、RTDの非線形キャパシタンスを含む回路シミュレーションを行った。その結果、非線形キャパシタンスおよび複数の反射面からの光フィードバックがモード同期に必要なことがわかった。以上から、このモード同期現象は、従来からレーザーで知られているモード同期の機構とは全く異なった機構であることを結論した。</p> <p>最後に、非線形キャパシタンスの物理的起源に関して考察を行い、RTDにおける共鳴トンネル現象がその要因となり得ることを指摘した。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、テラヘルツ周波数領域の半導体発振器である共鳴トンネルダイオード (RTD) 発振器における非線形応答を詳細に調べている。RTDテラヘルツ発振器においては、光アシストトンネリングをはじめとした共鳴トンネル系に特有の量子効果によって、非自明なダイナミクスが生じる可能性がある。自律振動子個別の性質は主に外力に対する非線形応答に表れるが、これまでのRTDテラヘルツ発振器の研究は自由発振特性に着目したものが大多数であり、非線形応答特性を系統立てて調べた研究はなかった。

本研究では、標準信号光や自らの発振光の注入に対する非線形応答特性を調べている。注入信号の振幅が発振器の発振振幅よりも十分小さい弱注入条件における注入同期特性は、解析的なモデルとの対比が可能であることから、自律振動子の性質を明らかにする上で重要である。しかし、これまでRTDテラヘルツ発振器の弱注入条件での非線形応答はこれまで明らかにされていなかった。これは意図しない散乱光などによって発振器にフィードバックの効果が生じてしまうことが原因であった。可視域においては、その除去にアイソレータを用いるが、テラヘルツ領域にはそのような光学素子は存在しない。本研究では、テラヘルツ光を一方向のみに透過する光学素子を作り、光フィードバックを排除できる光学系を構築した。また、光周波数コムに同期した高安定なヘテロダイン光学系を構築し、時間変動するスペクトルの精密計測を行った。これらにより、弱注入領域におけるRTDテラヘルツ発振器の注入同期特性の精密計測に世界で初めて成功している。

標準信号光の注入同期の実験においては、同期が生じる注入周波数範囲が、弱非線形振動子に関する一般的なモデルであるAdlerモデルによって概ね記述されることを実証した。また、動作条件によってはAdlerモデルからの逸脱が見られ、RTDの非線形キャパシタンスがそのような逸脱の原因となり得ることを指摘している。さらに、極めて小さな注入レベルにおける注入同期も評価し、ノイズとの競合が重要な役割を果たすことを明らかにした。これを一般的な自律振動子に適用可能とされるモデルによって説明している。これらの結果は、RTDテラヘルツ発振器の様々な外力に対する応答特性を議論する上での基礎になる重要な結果である。

また、光フィードバックによって生じるRTDテラヘルツ発振器のモード同期現象を発見し、詳細に生成条件を調べている。モード同期が生じる条件として、自由発振周波数が急激に変化する領域にバイアス電圧を設定することが重要であることを明らかにした。また、ヘテロダイン時間波形の計測と評価を行い、それが典型的なレーザーのモード同期で見られる強度変調波形ではなく、周波数変調波形であることを明らかにした。さらに、回路シミュレーションによって、RTDの非線形キャパシタンスおよび複数の反射面からの光フィードバックが同期に必要なことを明らかにした点は高く評価される。非線形キャパシタンスの起源として、量子トンネル効果を指摘しており、今後の研究に対する道筋を与えている。本研究で発見したモード同期は、レーザーなどで知られているものとは異なる機構を有しており、非線形動力学の新しい実験舞台として位置付けることができる。

以上のように、本論文では、RTDテラヘルツ発振器における非線形応答特性として、弱注入領域における注入同期特性と光フィードバックによるモード同期特性を明らかにした。特に、RTDの非線形キャパシタンスが非線形応答に果たす役割を明らかにした点は高く評価される。よって、博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和3年7月20日に論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。