

氏 名	千 葉 作 富 郎
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 2 月 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 26 年 3 月 東北大学工学部電気工学科卒業
学 位 論 文 題 目	トランジスタ水晶発振器の回路条件と周波数安定度に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 高木 相 東北大学教授 西澤 潤一 東北大学教授 斎藤 伸自

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 緒 論

1949年W. Shockley らによってトランジスタが発明され、1950年代に入ってトランジスタを中心とした半導体エレクトロニクスの時代を迎え、トランジスタ水晶発振器は着実に進歩発展している。

従来の水晶発振器の研究では、ほとんどの回路を線形回路として考えており、非線形問題として取り上げた研究はない。これは回路のQが高く発振波形はほぼ純粋な正弦波であるため Van der Pol の式で  $du/dt$  の係数はほとんど零になるということ（線形になる）から矛盾はない。しかし従来の研究では回路論的な考察は十分でなく実験的な研究がほとんどである。

従来の水晶発振器の研究の主流は2端子負性抵抗理論であった。しかしそこには余った負性抵抗をどのように扱うか、あるいは、これを積極的に発振周波数安定化に利用するという考え方は生まれて来っていない。

筆者の研究は負性抵抗形発振器ではなく、帰還形発振器として扱った方がより合理的で有利であるとの考え方に立っている。すなわち筆者は所要増幅度を小さくして、余裕利得を直交流の負帰還に廻してトランジスタパラメータの変動を抑圧して  $\Delta f/f(V_c, T_a)$  の小さい帰還形水晶発振器に新たに開発した。(電源電圧の変化による発振周波数変動率を  $\Delta f/f(T_a)$ 、両者による発振周波数変動率を  $\Delta f/f(V_c, T_a)$  と表す。電源電圧 1Vあたりの発振周波数変動率を  $\Delta f/f/V$  と表すことにする。)

筆者の考えによれば、発振周波数の安定化の手法としては、(1) 電源電圧や周囲温度の変化によるトランジスタパラメータの変動が発振周波数に影響しないように相殺する方法（パラメータ相殺形）、(2) 能動回路と周波数決定回路とをデカップリングする手法（デカップリング形；増幅器と周波数決定回路とを粗結合にして増幅器の入出力インピーダンスが発振周波数に影響し難いようにする方法をここではデカップリングと称する。）などがある。特に (2) の手法は筆者が始めて導入したものである。

ここで (1) の手法に関しては多くの報告があるがこれらの実験結果によれば

$$\Delta f / f / V \simeq 8.3 \times 10^{-7} / V \sim 5.6 \times 10^{-9} / V$$

程度である。筆者の (2) の手法を用いる回路方式の理論的考察と実験によれば  $\Delta f / f / V = 8 \times 10^{-10} / V$  程度に向上させることが可能となっている。

以上のように従来の研究では水晶発振器の周波数安定化に関して種々研究されているが、その安定度は必ずしも十分ではなく、また電源電圧、周囲温度ともに大幅に変化する過酷な環境のもとでの安定化を意図した研究は少い。筆者は回路に上記 (1) と共に特に (2) の手法を導入して、電源電圧や周囲温度が大幅に変化する環境でも従来以上に安定化し得る手法を開発した。

## 第 2 章 電流と電圧帰還形発振器の構成法

第 2 章では従来の発振器理論の問題点を明らかにするとともに本論文で提案する発振回路の基礎となる考え方を明らかにした。すなわち

- (1) 所要増幅度、 $X_{12} \leq 1$ 、とし、余分の増幅器の利得を有効に利用した負帰還回路を施すことにより増幅器を安定化する。
- (2) 増幅器の入力インピーダンスを極めて大きく、あるいは小さくすることにより、増幅器の出力インピーダンスの変動による発振周波数変動を抑制するという手法である。このことにより周囲温度や電源電圧の変動による発振周波数変動を抑制することが可能である。

さらに、この考えに基づき、帰還量が電流である場合と電圧である場合について分けて入力インピーダンスについて、

- (1) 電流帰還形発振回路において、増幅器の入力インピーダンス、 $Z_{i1} = 0$  とすれば発振周波数は、増幅器の出力インピーダンス  $Z_{o1}$  の影響は受けない。
- (2) 電圧帰還形発振回路において、増幅器の入力インピーダンス、 $Z_{i1} = \infty$  とすれば発振周波数は、増幅器の出力インピーダンス  $Z_{o1}$  の影響は受けないことを理論的に示した。

## 第 3 章 電流帰還形水晶発振器

第 3 章では電流帰還水晶発振器の特性を明らかにした。ベース接地形水晶発振器においては、ベース接地形増幅器と水晶帰還回路とを組み合わせた電流帰還形の発振回路が高安定水晶発振器として適していることを提案した。すなわち、入力インピーダンスが小さく、出力インピーダンスが大きくとれるベース接地形トランジスタ増幅器を用いた水晶発振器について考察した。この場合、周波数決定回路の容量の比を最適な値とすることにより、増幅器の所要増幅度を下げた。これにより、コ

レクタよりベースへ抵抗を介して直流負帰還を施すことにより、等価的なコレクタ抵抗を減少させることが可能となり、 $\Delta f / f (V_C, T_a)$  を減少させた。

更に容量  $C_1$  をなるべく小さい値とし、かつコレクタ容量の小さいトランジスタを用いることにより、 $\Delta f / f (V_C, T_a)$  を減少させた。ここでは発振回路を構成する素子は汎用のものでよく、特別な素子を必要としない。

この結果、約 1 MHz において電源電圧の約 45% の変化に対して 0.016 Hz の変動に抑えられるという良好な安定化特性を得た。また、電源電圧 1 V あたりの発振周波数変動率は、 $\Delta f / f / V = 8 \times 10^{-10} / V$  となり、これは従来知られている発振方式に比べてかなり良好な特性となっている。

解析とコンピュータシミュレーションとにより実測値とほぼ一致する理論値が得られ、各パラメータの変化の影響を把握することができた。すなわち、電源電圧に対する周波数変動率は、トランジスタのエミッタ抵抗とコレクタ容量とにより影響されていることが判明した。更に、周囲温度に対する周波数変動率は、ベース抵抗、エミッタ接地電流増幅率も影響していることが明らかとなった。

#### 第 4 章 電圧帰還形水晶発振器

第 4 章では電圧帰還形水晶発振器の特性を明らかにした。ベース接地形とコレクタ接地形との直結 2 段増幅器と水晶振動子 1 個とを組み合わせた電圧帰還形ブリッジ形発振回路が高安定水晶発振器として適していることを提案した。この場合、水晶振動子と抵抗 3 個とによりブリッジ回路を構成しているので、初段トランジスタのエミッタ入力インピーダンスを極めて大きくすることができる。このため、発振周波数へ影響する増幅器の出力インピーダンスの度合いを極めて小さくすることができた。更に増幅器の所要増幅度を小さくして、余裕増幅度を直交流の負帰還に廻すことにより、トランジスタパラメータの変動を抑圧して得て、 $\Delta f / f (V_C, T_a)$  を減少させることができた。この際発振回路を構成する素子は汎用のものを用い、特別な素子を必要としない。

この結果、約 1 MHz において、電源電圧の約 55% の変化に対して 0.016 Hz の変動に抑えられるという良好な安定化特性を得た。また電源電圧 1 V あたりの  $\Delta f / f$  は、 $\Delta f / f / V = 8 \times 10^{-10} / V$  となり、これは、従来知られている発振方式に比べて、かなり良好な特性となっている。

解析とコンピュータシミュレーションとにより、発振周波数変動率は、トランジスタのエミッタ抵抗の変動率とトランジション周波数の変動率とにより影響されていることが判明した。

#### 第 5 章 パラメータ相殺形水晶発振器

第 5 章ではパラメータ相殺形水晶発振器の特性を明らかにした。

すなわち、コレクタよりベースへ抵抗を介して強力な負帰還を施したところの新しいエミッタホロワ形発振回路を提案した。エミッタ・アース間とベース・アース間の各抵抗値を適当値にすることにより  $\Delta f / f (V_C)$  特性が極小値特性曲線を示した。この結果、約 1 MHz において、電源電圧の約 45% 変化に対して 0.016 Hz の変動に抑えられるという良好な安定化特性を得た。また  $\Delta f / f / V = 8 \times 10^{-10} / V$  となり、これは従来の発振方式に比べてより秀れた特性となっている。

解析とコンピュータシミュレーションとにより、発振周波数変動率はトランジスタのエミッタ抵

抗, コレクタ容量, ベース接地電流増幅率, ベース抵抗らの変動率により影響されていることが判明した。

## 第6章 結 論

トランジスタ水晶発振器の発振周波数安定化の手法としては (1) のパラメータ相殺形と (2) デカップリング形とに大別できる。それらの問題点を指摘し, 問題解決の方法を明らかにした。

例えば電流帰還形発振器は, 増幅器の入力インピーダンスを零にすると, 増幅器の出力インピーダンスが発振周波数に影響しないことを明らかにした。双対の理により電圧帰還形発振器の場合にも言及した。

さらに電流帰還形水晶発振器の具体例として, ベース接地形水晶発振器を提案し, 周波数決定条件として8次方程式を導出して, コンピュータシミュレーションにより, 各素子値を選定して発振回路を設計した。その結果 $\Delta f / f (V_c, T_a)$ 特性が従来の発振方式に比べて, かなり秀れていることを明らかにした。

さらに, 電圧帰還形水晶発振器の具体例として, ブリッジ形水晶発振器を提案し, 直結2段増幅器と水晶振動子1個のみで発振器を構成して, 各素子値を実験的に選定し $\Delta f / f (V_c)$ 特性の秀れた高安定水晶発振器を開発した。さらにシミュレーションにより発振周波数変動率を与えるトランジスタパラメータの変化の影響を把握することができた。

さらにパラメータ相殺形の具体例として, コレクタ負帰還形エミッタホロウ水晶発振器を提案し, 各素子値を適当値とすることにより, 実験的に $\Delta f / f (V_c)$ 特性が極小値特性曲線を示すようにした。極小点近傍での各素子値を実験的に決定した結果,  $\Delta f / f (V_c, T_a)$ 特性は従来の発振方式に比べてかなり秀れていることを明らかにした。またトランジスタパラメータの相殺の結果として極小値特性曲線が現れることを理論的に明らかにした。

## 審 査 結 果 の 要 旨

トランジスタ水晶発振器は安定な周波数を得る発振器として広く利用されている。この発振器の周波数安定度は現在およそ $10^{-8}$ （電源電圧1V，周囲温度1℃あたり）程度であるが，さらに高い安定度のものが望まれている。著者は発振回路を詳細に検討し，高安定度を得る回路条件を見出し，この回路条件のもとで従来より1～2桁高い発振周波数安定度を得ることに成功した。本論文はこの研究成果を取りまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では，従来のトランジスタ水晶発振回路を詳細に検討し，発振周波数を安定化させるための方法は大きく2つに分けられることを述べている。すなわちそれらは，水晶振動子とトランジスタ回路とを，発振条件を維持しながら，できるだけ疎結合にする方法，および発振周波数の変動に正の影響を与えるトランジスタパラメータと負の影響を与えるトランジスタパラメータとを組み合わせさせて安定化を図る方法の2つである。著者は前者をデカップリング形と称し後者をパラメータ相殺形と称している。そして，デカップリング形の回路条件を明らかにしている。これは有用な知見である。

第3章では，デカップリング形水晶発振器の具体的回路のひとつとして，電流帰還形回路を与えている。この場合，増幅部を構成するトランジスタの入力インピーダンスが出来るだけ小さいことが高安定化の条件となる（第2章）が，このために強い電流負帰還を施す回路を考案し，この回路の最適化を図り， $10^{-10}$ のオーダーの安定度を得ている。

第4章では，デカップリング形のもうひとつの回路方式である電圧帰還形回路を与えている。この場合はトランジスタの入力インピーダンスは出来るだけ大きいことが高安定化の条件（第2章）であるが，これを実現するため強い電圧負帰還を施す回路を考案し，やはり $10^{-10}$ のオーダーの安定度を得ている。

第5章では，パラメータ相殺形水晶発振器について述べている。第3章と第4章で，強い負帰還を施すことが発振周波数の安定化に有効であるとの知見を生かし，ここでも新しい回路を考案している。そして，種々のトランジスタパラメータの変動が，発振周波数の変動にどのように影響するかを明らかにしてこの回路の最適化を図り，ここでも $10^{-10}$ のオーダーの安定度を得ている。

第6章は結論である。

以上要するに，本論文はトランジスタ水晶発振器の安定化に必要な回路条件を新しく導入し，この条件に適合する回路を考案して，従来より1～2桁高い発振周波数安定度を得た成果を述べたもので，電子回路工学の発展に資するところが少なくない。

よって，本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。