

四極構造の真空トランジスタを用いた周波数混合実験

安友 佳樹[†] 大上 航[†] 後藤 康仁[†] 辻 博司[†]

[†] 京都大学大学院工学研究科電子工学専攻

E-mail: †y.yosiki@ky2.ecs.kyoto-u.ac.jp, ††wataruo@technologyelec.mbox.media.kyoto-u.ac.jp,
†††{ygotoh,tsuji}@kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし ゲート電極一体型の窒化ハフニウムフィールドエミッタアレイ (HfN-FEA)、コレクタ電極に加え、制御電極からなる四極構造真空トランジスタを構成し、周波数混合実験を行った。まずコレクタ電流の制御電極電圧に対する依存性を測定した。その結果エミッタ電圧が -60 V のとき制御電極電圧 -40 V \sim -50 V においてコレクタ電流を線形に制御できる領域があることが明らかになった。この部分について考察を行い、周波数混合の実現の可能性を示した。以上の結果を利用してエミッタ及び制御電極に交流信号を入力して周波数混合実験を行い、周波数混合が行われていることを確認した。

キーワード HfN-FEA、真空トランジスタ、制御電極、周波数混合

Mixing characteristics with vacuum tetrode transistor

Yoshiki YASUTOMO[†], Wataru OHUE[†], Yasuhito GOTOH[†], and Hiroshi TSUJI[†]

[†] Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto Univ.

E-mail: †y.yosiki@ky2.ecs.kyoto-u.ac.jp, ††wataruo@technologyelec.mbox.media.kyoto-u.ac.jp,
†††{ygotoh,tsuji}@kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract Frequency mixing experiment was carried out with a vacuum tetrode transistor which was composed of a hafnium nitride field emitter array (HfN-FEA), a collector, and a control grid. Collector current was measured whether the control grid can control the collector current. This experiment showed that collector current varied with respect to the change in the voltage of the control grid. A sinusoidal wave with the frequency and voltage of 10 kHz and 2 V_{pp} was inputted to the emitter. Another sinusoidal wave with the frequency and voltage of 15 kHz and 10 V_{pp} was inputted to the control grid. As a result, output wave was mixture wave of input waves.

Key words HfN-FEA, vacuum transistor, control grid, frequency mixing

1. はじめに

フィールドエミッタアレイ (FEA) は電子放出機構として電界電子放出を用いている。電界電子放出の利点は半導体デバイスの動作が困難な高温や極低温などの過酷環境下でも得られる電流密度に大きな変化がないという点である。我々は窒化ハフニウム (HfN) を用いた FEA (HfN-FEA) を用いて真空トランジスタを構成し、増幅素子としての動作特性を評価してきた。具体的な数値としては相互コンダクタンスとして 0.27 mS、コレクタ抵抗として 2.8 M Ω 、電圧増幅率として 1000、GB 積として 1 MHz 程度の値を得ている [1]。また、理論的には 36 MHz の GB 積が得られると計算されており、真空トランジスタの性能は既存のデバイスの特性に近づきつつある [2]。また、単純な増幅以外に新たな機能をもつ真空トランジスタの実現も期待されている。そこで、今回は真空トランジスタの新たな機能と

して周波数混合を検討した。周波数混合とは 2 つの信号の周波数の和の成分及び差の成分を取り出す操作である [3]。エミッタ、ゲート、コレクタからなる三極構造の真空トランジスタに新たに電極を導入して四極構造とし、その電極の基本的な動作特性を測定した。そして、その結果を踏まえて周波数混合実験を行った。その結果、観測された出力波形のパワースペクトルにおいて入力した 2 つの信号の周波数の和の成分及び差の成分を確認した。つまり、周波数混合が行われていることを確認することができた。

2. 真空トランジスタを用いた周波数混合

2.1 従来の周波数混合

周波数混合とは 2 つの信号の積を得ることで出力として 2 つの信号の周波数の和の成分及び差の成分を得る操作である [3]。このため、高い周波数の信号を低い周波数に変換して増幅する

ことが可能であり、ヘテロダイナ検波に利用されていた。これまで周波数混合管はカソード-プレート間に5つのグリッドを持つ7極管構造をしている。これらのグリッドをカソード側から順に第1グリッド～第5グリッドとすると第2グリッド、第4グリッドに信号を入力することでカソードから放出された電子を制御している。

2.2 真空トランジスタを用いた周波数混合器の構成

我々は電界電子放出電子源として HfN-FEA を使用している。HfN-FEA の作製プロセスについてはこれまでに報告したものと同様である [4]。冷陰極材料として HfN を用いることで電子放出の安定化を図っている。また、HfN は耐酸化性に優れるという利点もある [5]。この HfN-FEA にコレクタ電極を取り付けることで三極構造の真空トランジスタを構成する。今回はエミッタから放出された電子の制御を行うためにゲートとコレクタの間に新たに電極 (制御電極) を導入し四極構造の真空トランジスタを構成した。なお、HfN-FEA とコレクタ間の距離は約 5 mm、HfN-FEA と制御電極間の距離は約 1 mm とし、ゲートは接地とした。また、ゲートが接地されているため、エミッタと制御電極が遮蔽されているという利点もある。本来ならばコレクタと制御電極の間を遮蔽する電極を導入する必要がある。しかし今回はより単純な構成で実験を行うためにこの電極の導入は行わなかった。制御電極の導入方法としてはゲート-コレクタ間にボンディングワイヤを配線することで行った。

2.3 真空トランジスタを用いた周波数混合器の動作原理

このような構造の真空トランジスタによる周波数混合の動作原理は次のようになる。エミッタに印加された電圧によりエミッタは電界電子放出を行う。放出された電子はコレクタに向けて進んでいくが、制御電極に負電圧を印加しておくことで放出された電子の一部はゲートに追い返され、コレクタ電流は減少する。さらに、制御電極に交流信号を重畳しておくことで、コレクタに到達する電子の割合は制御電極に入力する交流信号に追従して変化することになる。このときエミッタにも交流信号を重畳すると、エミッタから放出される電子の総数がエミッタに追従して変化することになる。よって出力となるコレクタ電流はエミッタ及び制御電極に入力する信号によって制御されることとなり、周波数混合が行われると考えられる。

3. 制御電極の制御能力測定

3.1 電子源の電子放出特性の測定

今回の周波数混合実験で用いる HfN-FEA の電子放出特性の測定を行った。FEA には 10,000 tip のエミッタが正方格子状に配置されたアレイを用いた。アレイ全体としては正方形をしている。そして、FEA、コレクタ電極、制御電極で四極構造真空トランジスタを構成し真空槽内に設置した。測定回路を図 1 に示す。なお、真空槽はスパッタイオンポンプを用いて 3.0×10^{-6} Pa で一定とした。ゲート、制御電極を接地し、コレクタ電圧 V_C を 200 V とした上でエミッタ電圧 V_E を 0 V から -65 V まで変化させた。このときのコレクタ電流 I_C 、エミッタ電流 I_E 、ゲート電流 I_G を測定した。測定結果を図 2 に示す。この測定結果より今回実験で使用する FEA は V_E を -60 V とし

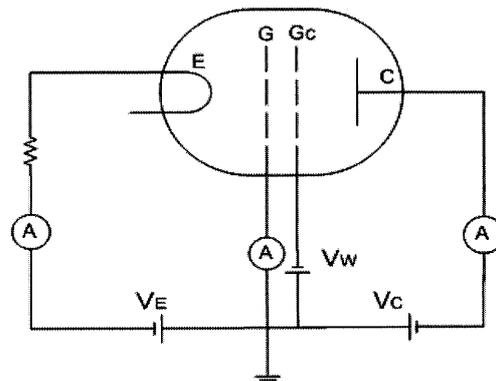


図 1 電子放出特性測定回路

Fig.1 Circuit for field emission

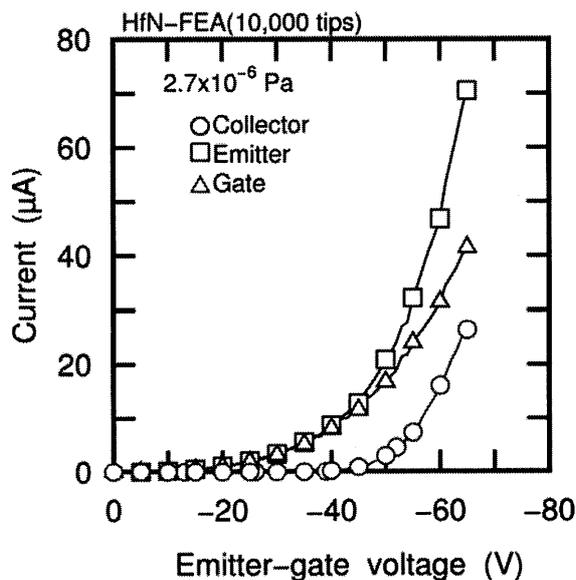


図 2 電子放出特性

Fig.2 I-V plot

たとき 15 μ A 程度の I_C を得られることが分かった。

3.2 制御電極の直流動作特性測定

コレクタ電流の制御電極電圧に対する依存性を測定した。このとき V_C は 0 V、-10 V、-20 V とした。これはエミッタから放出される電子のエネルギーを小さくすることで制御電極での電子制御を容易にするためである。 V_E は先程の実験結果から -60 V で一定とし、ゲートを接地した。そして制御電極に印加する電圧 V_W を 0 V から -60 V まで変化させたときの I_C 、 I_E 、 I_G を測定した。図 3 に V_C が 0 V のときの測定結果を示す。 I_E は制御電極電圧に関わらず一定であった。 I_C は V_W が -30 V より大きくなると徐々に減少した。また、 V_W が -40 V から -50 V の領域では I_C はほぼ直線的に減少した。 I_G は V_W が -30 V より大きくなると徐々に増加した。 V_C が -10 V、-20 V のときも同様の結果が得られた。この結果について I_E はエミッター-ゲート間の電位差に依存しているため一定であったと考えられる。また V_W が大きくなるとエミッタから放出された電子が V_W によって追い返され、コレクタに到達できる電子の割合が減少する。そしてコレクタに到達できない電

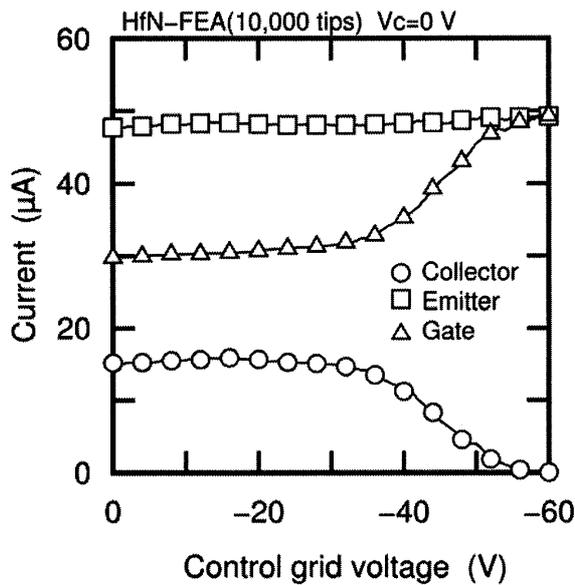


図3 制御電極の直流動作特性

Fig. 3 DC characteristics of the control grid

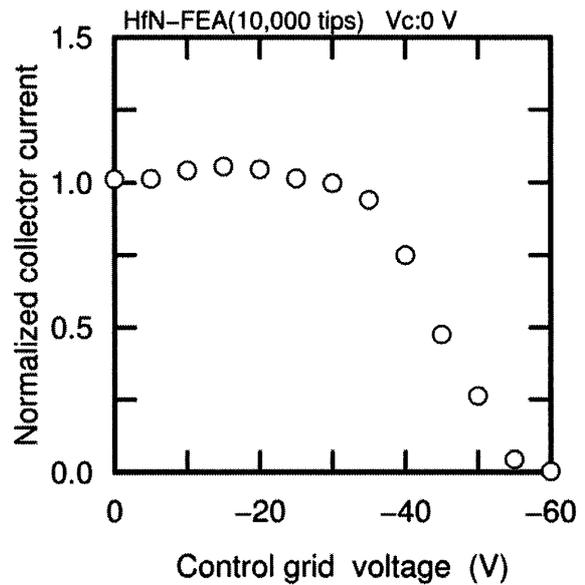

 図4 規格化後の I_C

Fig. 4 Normalized collector current

子はゲート電極に入り込む。このことにより I_C の減少に伴い I_G は増加すると考えられる。また、周波数混合に重要なのは出力となる I_C である。 I_C が直線的に減少している部分に接続を引いた結果、これらの直線の傾きは $0.8 \mu\text{S}$ 程度でコレクタ電圧にかかわらず一定であった。後述するが、周波数混合においてはバイアスを加えた上で信号を印加する。そのため I_C の直流成分とコレクタ抵抗により V_C が低下する可能性がある。今回の測定結果から V_C が低下しても I_C の特性は大きく変化しないことが明らかとなった。

3.3 制御電極の特性評価

これまでの結果から制御電極電圧により I_C が直線的に変化する領域があることが分かったのでこの部分に関する考察を行う。今回は V_C が 0 V のときを考える。 I_C が $15 \mu\text{A}$ 程度で一定の部分基準として規格化を行う。そのときの I_C を図4に示す。 I_C が直線的に変化する部分の傾きを取ると $5 \times 10^{-2} \text{ V}^{-1}$ 程度であり、切片は3程度であった。また、エミッタから放出された電子のうちコレクタに到達する割合を η とする。 I_C が直線的に変化する部分の傾きと切片をそれぞれ A 、 B とすると η 、 I_C は次のように表せる。

$$\begin{cases} \eta = AV_W + B \\ I_C = \eta I_E(V_{EG}) \end{cases} \quad (1)$$

V_{EG} はエミッタ-ゲート間の電圧である。上式より I_C は次のように表すことができる。

$$I_C = (AV_W + B)I_E(V_{EG}) \quad (2)$$

V_W に信号 $v_W \sin \omega_1 t$ を重畳させると式(2)は

$$i_C = \{A(V_W + v_W \sin \omega_1 t) + B\}I_E(V_{EG}) \quad (3)$$

となる。また $I_E(V_{EG})$ は相互コンダクタンスとエミッタ-ゲート間の電圧の積で表現されるので式(3)は

$$i_C = \{A(V_W + v_W \sin \omega_1 t) + B\}I_C(V_{EG}) \quad (4)$$

となる。このときエミッタに交流信号 $v_E \sin \omega_2 t$ を重畳することとで式(4)は

$$i_C = \{A(V_W + v_W \sin \omega_1 t) + B\}(I_0 + g_m v_E \sin \omega_2 t) \quad (5)$$

となる。ここで I_0 はコレクタ電流の直流成分である。つまりエミッタ及び制御電極に交流信号を入力することで出力となる i_C は入力した2つの信号の積を含む項を得ることができる。よってエミッタ及び制御電極に交流信号を入力することで周波数混合を実現できると考えられる。式(5)にある定数 A は制御電極のコレクタ電流に対する制御能力を示しており、周波数混合を行う際にはこの値が大きいほど I_C の制御が容易になる。

これまでの研究で HfN-FEA は特性を改善するために tip 数の増加を図っている [1]。現在 40,000 tips 程度までエミッタの数を増加させ、 I_C は -60 V で 1.5 mA 程度と今回の実験の100倍程度の値を得ている。この特性を持つ真空管トランジスタを用いれば A は今回の値の100倍程度の値になると考えられ、より容易に I_C を制御できると考えられる。

4. 周波数混合実験

これまでの実験結果から周波数混合実験のパラメータを次のように設定した。エミッタには -60 V 、制御電極には -45 V のバイアスを与える。コレクタ、ゲートは接地する。混合する信号はエミッタ及び制御電極に入力する。エミッタに入力する信号は 10 kHz 、 2 V_{pp} とし、制御電極に入力する信号は 15 kHz 、 10 V_{pp} とする。交流信号の入力にはファンクションジェネレータを用いた。また、コレクタには負荷抵抗として $1 \text{ M}\Omega$ の抵抗を接続した。負荷抵抗に出力される電圧波形をデジタルオシロスコープで観測した。出力された波形のパワースペクトルを図6に示す。 5 kHz 、 10 kHz 、 15 kHz 、 20 kHz 、 25 kHz 、 30 kHz のところにピークを確認することができる。このうち

文 献

- [1] 池田、大上、後藤、辻、信学技報 **137**(2010) 47.
- [2] K.Ikeda, W.Ohue, K.Endo, Y.Gotoh, H.Tsuji, J. Vac. Sci. Technol. B **29** (2011) 02B116.
- [3] 濱田成徳、和田正信、真空管工学、コロナ社、1965.
- [4] 後藤、瀬戸島、神澤、小島、藤井、辻、石川、信学技報 **106** (2006) 61.
- [5] 川島、藤井、芝原、後藤、辻、石川、第 52 回応用物理学学会学術講演会予稿集 (2005) 866.

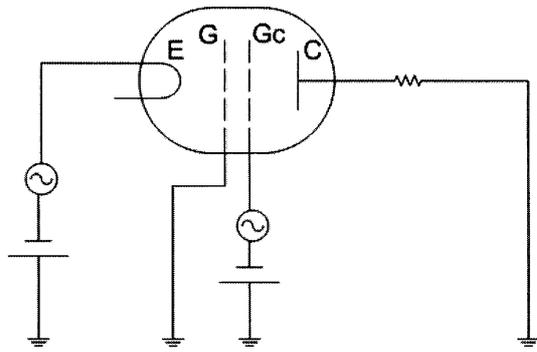


図 5 周波数混合回路

Fig. 5 Circuit for frequency mixing

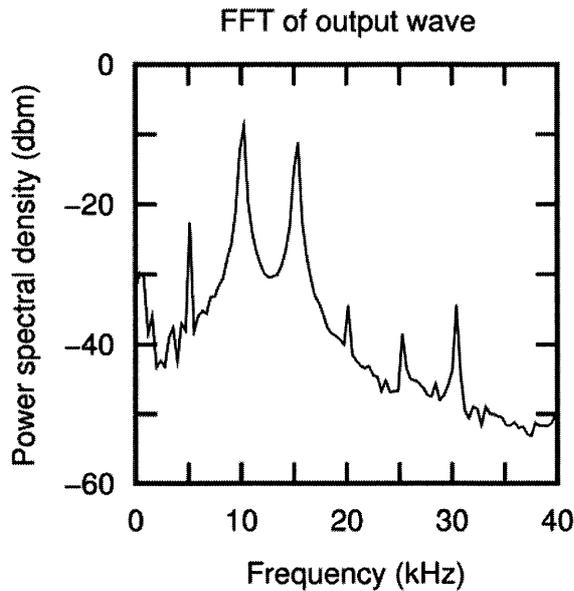


図 6 出力波形のパワースペクトル

Fig. 6 Power spectrum of output wave

10 kHz、15 kHz にあるピークはそれぞれエミッタ及び制御電極に入力した信号によるピークであると考えられる。また、20 kHz、30 kHz にあるピークはそれぞれ入力した信号の高調波成分によるピークであると考えられる。そして 25 kHz にあるピークは入力した信号の周波数の和の成分であると考えられ、5 kHz にあるピークは入力した信号の周波数の差の成分であると考えられる。この結果より、入力した 2 つの信号の周波数の和の成分及び差の成分を得ることができた。よって真空トランジスタによる周波数混合を実現することができた。

5. ま と め

周波数混合を行う真空トランジスタとしてゲートとコレクタ電極の間に新たに制御電極を導入した四極構造真空トランジスタを提案した。制御電極の直流動作特性を測定した結果、制御電極はコレクタ電流を制御できることが確認され、周波数混合が実現可能であることを示した。このことから周波数混合実験を行った結果、10 kHz、15 kHz の信号を入力することで出力として 5 kHz、25 kHz の成分が得られ、周波数混合が行われたことが示された。