

真空トランジスタによる振幅変調波の検波

後藤 康仁[†] 池田 啓太[†] 大上 航[†] 安友 佳樹[†] 辻 博司[†]

[†] 京都大学大学院工学研究科電子工学専攻

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

あらまし 電界放出電子源アレイを用いた真空トランジスタの電子回路応用として、中波帯の信号の検波を行った。500 kHz から 5 MHz までの搬送波信号を 500 Hz から 2 kHz の信号で振幅変調した信号を、検波した。その結果、変調信号 500 Hz の場合、5 MHz では若干歪んだ出力であったものの、2 MHz 程度までは同様な検波出力を得た。

キーワード 真空トランジスタ, 振幅変調, 検波

Rectification of Amplitude Modulated Signals with Vacuum Transistor

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

[†] Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University

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

Abstract Attempts have been made to apply a vacuum transistor to a rectification circuit at medium frequencies. A carrier signal with the frequency between 500 kHz and 5 MHz were amplitude modulated by a audio signal with the frequencies between 500 Hz and 2 kHz, and the modulated signal was rectified by a circuit with a vacuum transistor. As a result, it was found that the signal with the frequency below 2 MHz was rectified similarly, although that with the frequency of 5 MHz was distorted.

Key words vacuum transistor, amplitude modulation, rectification

1. はじめに

我々は電界放出電子源アレイとコレクタからなる新しい真空三極素子を真空トランジスタと名付け、その電子デバイスとしての可能性を検討している [1]~[3]。前回は 40,000-tip のアレイを用いた真空トランジスタの性能について報告した。現在のところ、三極素子の真空トランジスタで利得帯域幅積 1 MHz の値を得ている。この程度の周波数で動作することができれば、中波帯の信号の処理を行うことも可能である。

電界電子放出では、電流電圧特性が非線形であるために、増幅をおこなう際に歪が生じる可能性がある。逆にこのことを利用して、振幅変調波の検波をすることができる。今回、真空トランジスタを用いた検波回路を構成し、実際に振幅変調波の検波を試みたので報告する。

2. 期待される特性

2.1 真空トランジスタの直流特性

三極真空トランジスタの電圧電流特性は、以下で表わされる。

$$I_E = I_C = N A V_{GE}^2 \exp\left(-\frac{B}{V_{GE}}\right) \quad (1)$$

I_E 、 I_C はそれぞれエミッタ電流とコレクタ電流であり、 V_{GE} はゲート・エミッタ間電圧である。 A 、 B は、真空トランジスタの構造や材料で決まる定数であり、ゲートへの電子電流の流入がないか、無視できる場合を考えている。また、 N は、動作しているエミッタの数である。動作点 $V_{GE} = V_0$ における相互コンダクタンス g_m は

$$g_m = \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{GE}} \right|_{V_0} = \frac{I_C}{V_0} \left(2 + \frac{B}{V_0}\right) \quad (2)$$

で表わすことができる。この式の特徴的な点は、動作しているエミッタの数 N にあらわには関係しないことである。今回は、この g_m の非線形性を取り上げるので、電流電圧特性の二次の微分、すなわち相互コンダクタンスの微分

$$\frac{\partial g_m}{\partial V_{GE}} = \frac{\partial^2 I_C}{\partial V_{GE}^2} \quad (3)$$

が問題となる。実際に微分して

$$\left. \frac{\partial g_m}{\partial V_{GE}} \right|_{V_0} = \frac{I_C}{V_0^2} \left\{ 2 + 2 \left(\frac{B}{V_0} \right) + \left(\frac{B}{V_0} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

を得る。上式より、交流分の正の電圧側と負の電圧側で g_m はそれぞれ

$$\begin{cases} g_m^+ = g_m|_{V_0} + \frac{\partial g_m}{\partial V_{GE}}|_{V_0} \Delta V_0 \\ g_m^- = g_m|_{V_0} - \frac{\partial g_m}{\partial V_{GE}}|_{V_0} \Delta V_0 \end{cases} \quad (5)$$

となる。搬送波の振幅を v_{car} 、変調度を m とすると、搬送波の振幅の変化 δv_{car} は

$$\delta v_{car} = m v_{car} \quad (6)$$

であるから、変調出力の振幅 v_o は

$$v_o = R_{out}(g_m^+ - g_m^-)m v_{car} = 2R_{out} \frac{\partial g_m}{\partial V_{GE}} m v_{car}^2 \quad (7)$$

与えられる。ただし、 R_{out} は、負荷抵抗の値である。

相互コンダクタンスやその微分がどの程度になるかは、理論式から導くことは難しい。しかしながら、39,460-tip のフィールドエミッタアレイ (FEA) において、0.27 mS の値を得ている [4]。このときの、電圧と電流、58 V、1.5 mA から、 $2 + B/V_{GE}$ はおよそ 10 と見積もることができ、 $B/V_{GE} = 8$ 程度となる。この値を用いれば、

$$\frac{\partial g_m}{\partial V_{GE}} \sim 36 \mu S V^{-1} \quad (8)$$

となる。 $v_{car} = 1$ V とし、 $m = 0.3$ とすれば検波された電流成分は、20 μA 程度となり、10 k Ω の負荷抵抗で、0.2 V の出力振幅となる。

3. 真空トランジスタの作製と直流動作特性

3.1 真空トランジスタの作製

真空トランジスタは、窒化ハフニウム (HfN) を陰極に持つ、40,000-tip の FEA を TO-5 型のヘッダ上に固定し、その 5 mm 程度上方に、コレクタを設置することで構成した。HfN-FEA の作製方法はすでに報告したとおりである [5]。本報では、作製の詳細は述べないが、FEA 自身の構造について簡単に説明する。40,000-tip FEA は、電子放出部位 (tip) が 6 μm 間隔で 200×200 の正方格子をなしている。エミッタとゲートの間は厚さ 1 μm の二酸化シリコン (SiO₂) の絶縁層で分離されている。

3.2 直流動作特性

直流動作特性は、エミッタを接地し、コレクタに 150 V の正電圧を印加した状態で、ゲートに 0 から正電圧を印加することで測定した。測定は超高真空装置の中で行った。結果を図 1 に示す。○がコレクタ電流 I_C 、△がゲート電流 I_G を表す。 $V_{GE} = 60$ V で、 $I_C = 0.7$ mA を得た。先に述べた FEA と比較すると、 I_C の値は半分程度である。ゲートに流れる電流は高々 10 μA 程度であった。

4. 振幅変調波の検波実験

4.1 検波回路

検波の実験を行う回路として図 2 のようなものを考えた。実際の回路応用を考えて、単電源による回路とした。またこれまではゲート接地として特性を調べたが、単電源とするためにエ

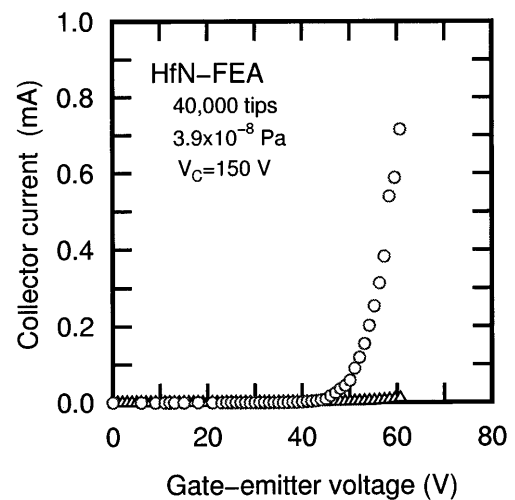


図 1 検波に用いた真空トランジスタの電子放出特性

Fig. 1 Electron emission property of vacuum transistor used for rectification

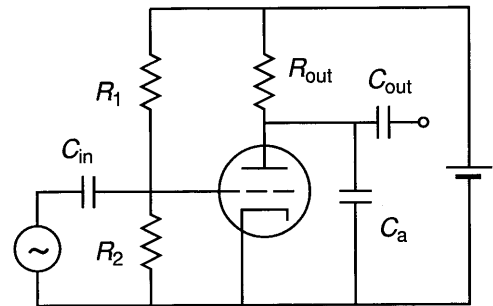


図 2 真空トランジスタを用いた検波回路

Fig. 2 Rectifying circuit with a vacuum triode transistor

ミッタ接地とした。単電源とすると、ゲートには動作点となる電圧を抵抗分割で与える必要がある。先の電流電圧特性の結果より、コレクタ電圧 150 V に対して、50–60 V のゲート電圧となるように、抵抗値 R_1 、 R_2 を決める。このとき、 R_1 、 R_2 を流れる電流がゲート電流に比較してある程度大きくなるようにするとよい。今回は、 $R_1 = 1$ M Ω 、 $R_2 = 330$ k Ω とした。

検波出力を取り出すために、コレクタに直列に負荷抵抗 R_{out} を接続した。高周波成分を除いて出力を得るために、コンデンサ C_a を挿入し、低周波成分のみ取り出すことにした。負荷抵抗 R_{out} とコンデンサ C_a の値は、それぞれ 10 k Ω と 0.01 μF とした。真空トランジスタ自身のコレクタ抵抗は 2 M Ω 程度と高いことが分かっており、ゲートとコレクタ間の静電容量も小さいため、出力特性は R_{out} と C_a で決まる。

4.2 測定方法

測定は以下の二通りの方法で行った。

4.2.1 搬送波周波数依存性

搬送波を振幅 1.5 V の正弦波とし、周波数を 500 Hz、1 MHz、2 MHz、5 MHz の四通りとした。変調信号の周波数は 500 Hz で一定とした。変調度は 0.3 である。

4.2.2 変調周波数依存性

搬送波は振幅 1.5 V の正弦波、周波数 1 MHz で一定とし、変調信号の周波数を 200 Hz、500 Hz、1 kHz、2 kHz の四通

表 1 検波実験: 搬送波周波数依存性の結果。変調波周波数 500 Hz で一定の時

Table 1 Results of the rectification experiment. A constant modulation frequency of 500 Hz.

Frequency of carrier	Output signal
500 kHz	0.18 V _{pp}
1 MHz	0.19 V _{pp}
2 MHz	0.24 V _{pp}
5 MHz	0.14 V _{pp}

表 2 検波実験: 変調波周波数依存性の結果。搬送波周波数 1 MHz で一定の時

Table 2 Results of the rectification experiment. A constant carrier frequency of 1 MHz.

Frequency of modulating signal	Output signal
200 Hz	0.19 V _{pp}
500 Hz	0.19 V _{pp}
1 kHz	0.17 V _{pp}
2 kHz	0.12 V _{pp}

りとした。変調度は 0.3 である。

いずれの場合も、振幅変調波はファンクションジェネレータで発生させ、出力の電圧はデジタルオシロスコープで観測した。なお、動作点は $V_{GE} = 58 \text{ V}$ とした。

4.3 測定結果

今回の実験では上記の条件すべての場合で、検波信号を得ることができた。以下で、搬送波周波数依存性、変調波周波数依存性について述べる。

4.3.1 搬送波周波数依存性

結果を表 1 に示す。表には、出力信号の電圧を V_{pp} で表わした。これは、一部の条件で出力波形が若干歪んでいる場合があり、振幅で表現できないためである。

搬送波の周波数を変化させた場合には、2 MHz 程度まではおよそ 0.2 V_{pp} の出力が得られているが、5 MHz では 0.14 V_{pp} と値が低くなっている。5 MHz のときの波形は大きく歪んでいた。

4.3.2 変調波周波数依存性

結果を表 2 に示す。この表も表 1 同様、 V_{pp} で表わしている。変調波周波数が 1 kHz くらいまではおよそ 0.2 V_{pp} の出力が得られているが、2 kHz では 0.12 V_{pp} と若干低下した。変調波周波数 200 Hz~2 kHz の間では、出力信号の大きな歪みは見られなかった。

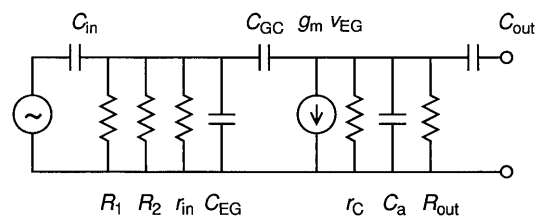


図 3 真空トランジスタを用いた検波回路の交流等価回路

Fig. 3 Ac equivalent circuit for the rectifying circuit with a vacuum triode transistor

5. 考 察

5.1 直流特性から求めた相互コンダクタンス

図 1 から、 g_m を求めるとおよそ 0.135 mS である。 V_{GE} が 1.5 V 変化した時の g_m はそれぞれ、0.15 mS、0.12 mS であったので、 $\partial g_m / \partial V_{GE} = 10 \mu\text{S V}^{-1}$ となる。上記の g_m と式 (2) から $B/V_0 = 11$ 程度と見積もることができる。これをもとに、 g_m の微係数を式 (4) を用いて計算すると、 $25 \mu\text{S V}^{-1}$ 程度となる。実験結果から得た値と比較するとかなり大きい。 B/V_{GE} の値の 11 がやや大きいものと考えられ、実験で得られた $\partial g_m / \partial V_{GE}$ から B/V_{GE} の見積もると、7 よりも若干小さい値となる。

5.2 検波出力

出力信号を式 (7) から求めてみると、 $v_o = 0.135 \text{ V}$ と計算される。これは振幅であるから、 V_{pp} に直すと、0.27 V_{pp} である。したがって、今回得られた検波結果の大部分は理論値のより若干小さいが、比較的よい値となっている。

少し詳しく回路の動作を調べるために交流の等価回路を考える。今の場合は図 3 のような形に書くことができる。出力電圧 v_{out} は

$$v_{out} = \frac{r_C // R_{out}}{1 + j\omega C_a [r_C // R_{out}]} g_m V_{GE} \quad (9)$$

今、ゲートとコレクタの間は間隔が 5 mm と広いことからこの部分の静電容量 C_{GC} については無視する。今回用いた真空トランジスタの r_C は測定していないが、冒頭で紹介したもので 2 M Ω であり、コレクタ電流が多いほど値は低下する傾向にある。従って、今回の真空トランジスタでは r_C は 2 M Ω 以上であると考えられる。 $R_{out} = 10 \text{ k}\Omega$ であることを考えると、 r_C の効果はほとんどないので、出力回路の周波数特性はほぼ $C_a R_{out}$ で決まると考えてよい。すなわち、

$$v_{out} = \frac{R_{out}}{\sqrt{1 + \omega^2 C_a^2 R_{out}^2}} g_m V_{GE} \quad (10)$$

である。500 Hz、1 kHz、2 kHz の時の v_{out} を計算すると、表 3 に示したように、表 2 の結果と合致する。従って、変調信号の周波数依存性は、回路の定数によるもので、これを改善することで、より高い変調信号まで検波できると考えられる。

検波出力の搬送波の周波数依存性は 2 MHz に極大をもつ特性となった。この原因については今のところ明らかではない。5 MHz で出力が落ちているのは、エミッタ・ゲート間の容量が

表 3 出力の周波数特性

Table 3 Frequency characteristics of output signal

Frequency	Experimental	Theoretical
dc	—	0.20 V _{pp} (assumed)
500 Hz	0.19 V _{pp}	0.19 V _{pp}
1 kHz	0.17 V _{pp}	0.17 V _{pp}
2 kHz	0.12 V _{pp}	0.12 V _{pp}

影響している可能性がある。今後詳細に検討したい。

6. ま と め

HfN-FEA を用いた真空トランジスタにより、2 MHz 程度までの振幅変調波の検波が可能であることを示した。検波出力が若干理論値よりも低い値となっている。詳細は今後検討する予定である。

文 献

- [1] 後藤、池田、宮田、遠藤、辻、石川、信学技報 ED2009-119 (2009).
- [2] 池田、大上、後藤、辻、信学技報 ED2010-137 (2010).
- [3] 後藤、池田、大上、辻、信学技報 ED2010-138 (2010).
- [4] K. Ikeda, W. Ohue, K. Endo, Y. Gotoh, H. Tsuji, J. Vac. Sci. Technol. B **29** (2011) 02B116.
- [5] 後藤、瀬戸島、神澤、小島、藤井、辻、石川、信学技報 ED2006-129 (2006).