



研究技術ノート

10 MHzの-3 dB通過帯域を持つ広帯域絶縁アンプの開発

Development of Wideband Isolation Amplifier with Frequency Response of 10 MHz

高岡亮太, 比村治彦

TAKAOKA Ryota and HIMURA Haruhiko

京都工芸繊維大学・大学院電子システム工学専攻

(論文受付: 2022年10月14日 / 論文受理: 2022年11月30日)

プラズマ実験では絶縁アンプが多用されている。本稿では、汎用の絶縁アンプの周波数特性を大きく上回る絶縁アンプ2種類を説明する。これらの絶縁アンプは研究室で安価に製作できる。したがって、多チャンネルの絶縁アンプが必要とされる様々なプラズマダイナミクス実験へと適用できる。

Keywords:

isolation amplifier, OP amplifier, wideband, probe measurements, laboratory plasma experiments, floating measurements, electric circuits

1. はじめに

最先端のプラズマ物理学における動的なプラズマの流体的取り扱いに二流体プラズマモデルがある。二流体モデルは、イオン流体の速度場と電子流体の速度場が異なるプラズマを記述する。このような二流体プラズマの平衡[1]や実験的検証[2-5]も行われている。

イオン速度場の能動的測定方法の一つ、マッハプローブ測定法[6,7]では、プローブ電流が0となるプローブ浮遊電位(フローティング電位)を回路の基準とする。一方、信号測定用計測器の基準電位は、通常は接地電位(COM)である。したがって、フローティング電位とCOMの間に有限の電位差が存在する。このような場合には、高い同相信号除去比(CMRR: Common Mode Rejection Ratio)を持つ増幅器(以降、“アンプ”と呼ぶ。)の使用が有効になる。CMRRの値が大きいアンプは、信号雑音比が小さいノイズ環境下での信号測定を行う際にも有用である[8]。

CMRRが高いアンプの一つが絶縁アンプである[9,10]。絶縁アンプは差動アンプ[10]とは異なり、アンプの同相入力電圧範囲がアンプの電源電圧によって制限されない。また、絶縁アンプの同相入力電圧の最大定格は、絶縁素子の耐圧によって規定される。このために、絶縁アンプの同相入力電圧の最大定格値は非常に大きい。この特性は、フローティング電位と接地電位間の電位差が数百ボルトになる高温プラズマに対するマッハプローブ測定も可能にする。さらには、絶縁アンプには、入力側から見た回路のインピーダンス不平衡によるCMRRの悪化や、高周波領域でのCMRRの著しい劣化といった差動アンプの欠点がない[11,12]。

Plasma Laboratory, Kyoto Institute of Technology, KYOTO 606-8585, Japan

アンプ内での絶縁素子にフォトカプラが用いられるタイプの場合、そのフォトカプラの特性のばらつきが他の素子とくらべて大きいために、絶縁アンプの入出力間の直線性、温度特性、そして、周波数特性がばらつきやすい[10]。このため、多数の絶縁アンプが用いられる多チャンネルプラズマ実験では、絶縁アンプ間の相対感度校正が不可欠となる。しかしながら、このばらつきは、フォトカプラを含めたフィードバックを採り入れることで、劇的に改善される。また、この方法によって、絶縁アンプの周波数特性は10 MHzが-3 dB通過帯域となる高周波帯まで大きく伸長する。この周波数特性は、一般に市販されている絶縁アンプの周波数特性を大きく上回る。本技術ノートでは、大学実験室で容易に製作できるその広帯域絶縁アンプについて解説する。

2. フォトカプラのモデル化

広帯域絶縁アンプには、Avago Technology社のリニアフォトカプラHCNR201を用いる。他のフォトカプラと同様に、HCNR201もLED(発光素子)とフォトダイオード(受光素子)から構成されている。LEDから放射される光の強度は、LEDに流れる順方向電流の大きさに比例する。フォトダイオードで受光されたLEDからの放射光は、フォトダイオードに適当な逆バイアス電圧が印可されている限り、放射光の強度に比例した光電流として現れる。この特性を利用して信号を絶縁伝送する場合、信号の大きさに比例した電流(以降、“信号電流”と呼ぶ。)に加えて、適当な順方向バイアス電流をLEDに流す必要がある。このため、一般的にLEDとフォトダイオードには、それぞれ適当な順方向バイアス電流と逆バイアス電

author's e-mail: himura@kit.ac.jp

圧が加えられる。この際、信号の伝達のみに着目して回路の動作を考える場合、LEDとフォトダイオードは、順方向バイアス電流と逆バイアス電圧を動作点とした小信号等価回路によりモデル化される。このモデルの中では、(1)式のようなLEDに流れる信号電流 I_L と逆バイアスがかけられたフォトダイオードに流れる光電流 I_p の間の関係式には1次遅れ系の伝達関数 K が与えられる。

$$I_p = KI_L, \quad K = \frac{K_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_L}} \quad (1)$$

ここで、 ω は信号電流の角周波数である。HCNR201の場合、(1)式の中の回路定数の値はそれぞれ表1の通りである。

3. 2.5 MHz 帯域用絶縁アンプ A

図1は、2.5 MHz が -3 dB 通過帯域となる広帯域絶縁アンプ A の回路図を示している。トランジスタ Q1 のベース電位の変動分を考慮すると、絶縁アンプ A の1次側入力電流 I_{in} ($=V_{in}/R_1$) と、フォトダイオード PD1 と PD2 に流れる光電流 I_{p1} の比 G_A ($\equiv I_{p1}/I_{in}$) は

$$G_A = \frac{A}{1+A} \quad (2)$$

と書ける。ここで、

$$A = \frac{K\beta R_1 R_2}{R_3(R_1 + \beta R_2 + j\omega\beta C_{pd}R_1 R_2)} \quad (3)$$

である。 C_{pd} はフォトダイオードの接合容量、 β はトランジスタ Q1 の電流増幅率である。ここで、 β は DC-10 MHz の周波数帯において十分大きく、 $\beta \gg R_1/R_2$ が成

り立つと仮定する。したがって、(3)式は以下のように近似される。

$$A = \frac{R_1}{R_3} \cdot \frac{1}{1 + j\omega C_{pd} R_1} \cdot \frac{K_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_L}} \quad (4)$$

これより、 G_A は、 $\omega_1 = 1/C_{pd} R_1$ 、 $\omega_2 = \omega_L$ の2つのカットオフ周波数を持つ2次遅れ系の伝達関数で近似される。

R_1 については、絶縁アンプ A の入力電圧範囲の上限と比例関係にある。ここで、LEDに流れる電流 I_L は10 mA 程度である。また、 $I_p = 0.0048 \times I_L$ は、 V_{in}/R_1 に等しくなるようにフィードバックがかけられている。したがって、 $V_{in} = R_1 I_p = 0.0048 \times R_1 I_L \leq 48 R_1 \times 10^{-6}$ (V) の関係式が成り立つ。これより、絶縁アンプ A の最大入力電圧は $48 R_1 \times 10^{-6}$ (V) となる。たとえば、最大入力電圧を 5 V と仮定する場合、 R_1 は 104 k Ω である。最大入力電圧が 1 V の場合でも、 R_1 は 20.8 k Ω である。このことから、絶縁アンプ A の最大入力電圧を 1 V 以上にする場合、 R_1 は 20.8 k Ω 以上にすることがわかる。一方、無バイアス状態でフォトダイオードの接合容量 C_{pd} の典型値が 22 pF なので、 $\omega_1 = 1/C_{pd} R_1 \leq 2.19 \times 10^6 \ll \omega_L = 56.5 \times 10^6$ (rad/s) の関係式が成り立つ。したがって、 $\omega_2 \gg \omega_1$ である。

次に、絶縁アンプ A のフィードバックの安定性について考える。 $\omega C_{pd} R_1 \ll 1$ が成り立つような ω に対して A は

$$A = \frac{1}{j\omega C_{pd} R_3} \cdot \frac{\alpha_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_L}} \quad (5)$$

と近似される。 $|A|=1$ となるときの A の偏角を θ_0 とすると、位相余裕 (フィードバックが発振する 180° の位相遅れと A の位相遅れの差) θ は $\theta = \theta_0 + \pi$ (rad) で与えられる。したがって、(5)式より、絶縁アンプ A の1次側のフィードバックの位相余裕 θ と回路定数の間には

$$C_{pd} R_3 = \frac{\alpha_0}{\omega_L} \frac{\tan^2 \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} \quad (6)$$

表1 フォトカプラに HCNR201 を用いる場合。

パラメータ	標準値
K_0	0.0048
$\omega_L/2\pi$ (MHz)	9

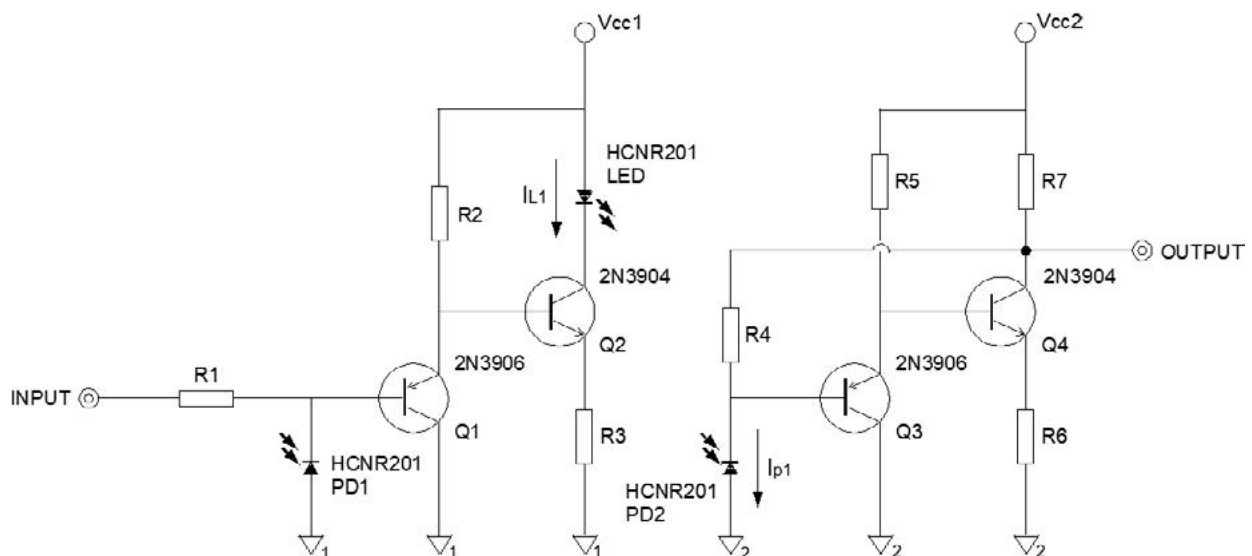


図1 絶縁アンプ A の回路図。

が成り立つ。これは、1次側フィードバックの高域側の周波数特性や安定性は $C_{pd}R_3$ で決定されることを意味している。つまり、 C_{pd} の小さなフォトダイオードを用いることや、フォトダイオードに逆バイアスをかけて実効的な C_{pd} の値を小さくすることは不要であり、 R_3 を調整すれば良いことになる。 $\omega_1 = 1/C_{pd}R_1 \approx \omega_L$ が成り立つ場合、上記の議論は成り立たないが、この条件が成り立つためには C_{pd} の値は 1 pF より小さい必要があるため、現実的に妥当な条件ではないと考え、ここでは割愛している。

図2は、絶縁アンプAの回路シミュレーション用の回路図である。このシミュレーションから得られる周波数特性が図3の実線である。実際に、図2の回路図に示した回路定数を用いて製作された絶縁アンプBの周波数特性の測定値が図3の×印である。グラフからわかるように、絶縁アンプAの-3 dB 通過帯域は2.5 MHzであることがわかる。

4. 10 MHz 帯域用絶縁アンプ B

図4は、10 MHz が-3 dB となる広帯域絶縁アンプBの回路図を示している。OPアンプA1とA2のオープンループゲインがそれぞれ A_1 と A_2 の時、絶縁アンプBの1次側入力電流 I_{in} ($=V_{in}/R_1$) とフォトダイオード (PD1, PD2) に流れる光電流 I_{p2} の比 G_B ($\equiv I_{p2}/I_{in}$) は

$$G_B = \frac{A}{1 + A \frac{Z_F}{Z} \left(1 + \frac{1}{A_2} (1 + j\omega C_p Z_F) \right) + \frac{1}{A_1} \left(1 + \frac{1}{j\omega C_1} \frac{(Z + R_1)}{Z R_1} \right)}$$

(7)

である。ここで、

$$A = \frac{K}{R_8} \frac{1}{j\omega C_1}$$

(8)

$$Z_F = \frac{R_5}{1 + j\omega C_2 R_5}$$

(9)

を表している。したがって、 $|A_1| > \left| \frac{R_8}{K Z_F} \right|$ 、かつ、 $|A_2| > |1 + j\omega C_p Z_F|$ のとき、式(7)は

$$G_B \approx \frac{A}{1 + A \frac{Z_F}{Z}}$$

(10)

と近似できる。この G_B の安定性は、閉ループゲイン $A Z_F / Z$ の位相余裕で決まる。 $A Z_F / Z$ は、

$$A \frac{Z_F}{Z} = \frac{1}{j\omega C_1 R_9} \cdot \frac{K_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_L}} \frac{Z_F}{Z}$$

(11)

なので、式(11)の分母より、 $1/j\omega C_1 R_9$ によって形成される一次極値と、 $K_0/(1 + j\omega/\omega_L)$ ($=K$) によって形成される一次極値によって位相が回転することがわかる。十分な位相余裕を得るためには、例えば C_1 を大きくして、閉ループゲインを小さくすればよい一方で、閉ループゲインが小さくなると周波数特性が悪化する。これを相殺させるために、 K のカットオフ周波数より少し低い周波数で微分補償を行う。

図5は、図4の回路のシミュレーション回路図を表している。このシミュレーションから得られる周波数特性が図6の実線である。実際に、図5の回路図に示した回路定数を用いて製作された絶縁アンプBの周波数特性の

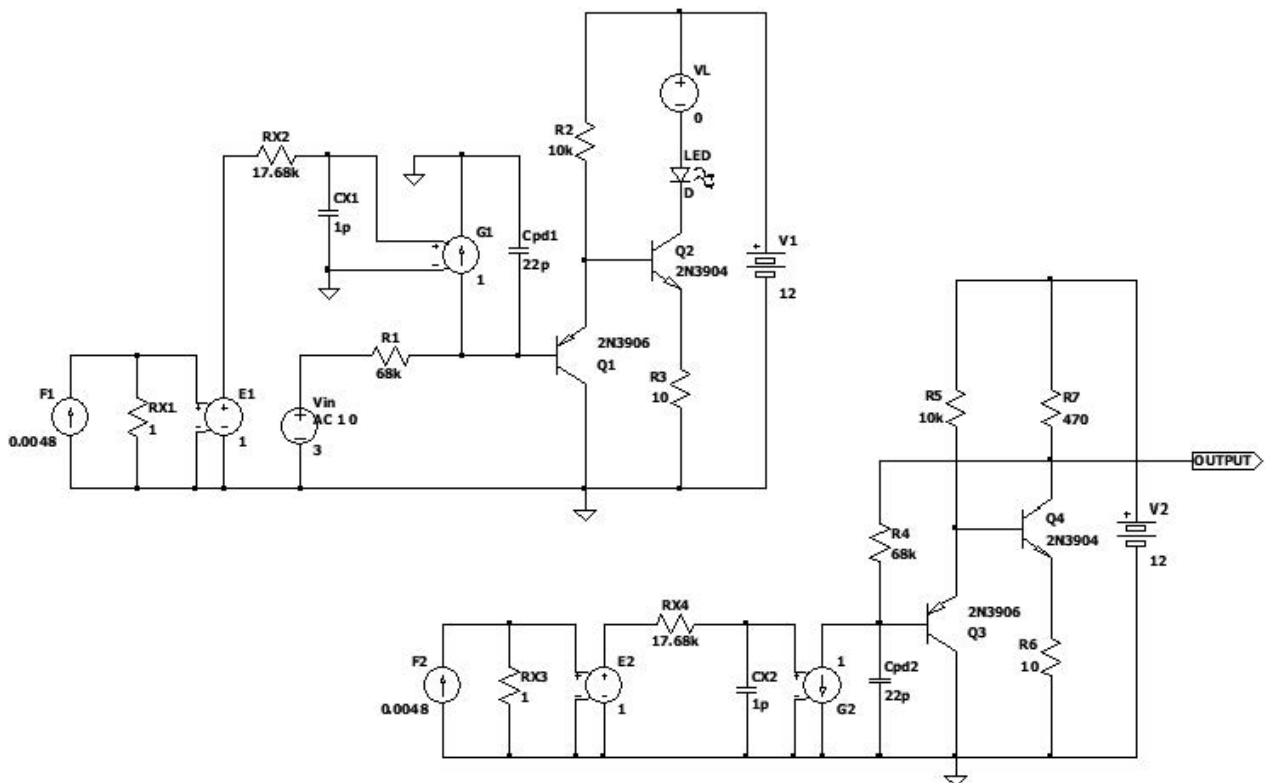


図2 絶縁アンプAのシミュレーション回路.

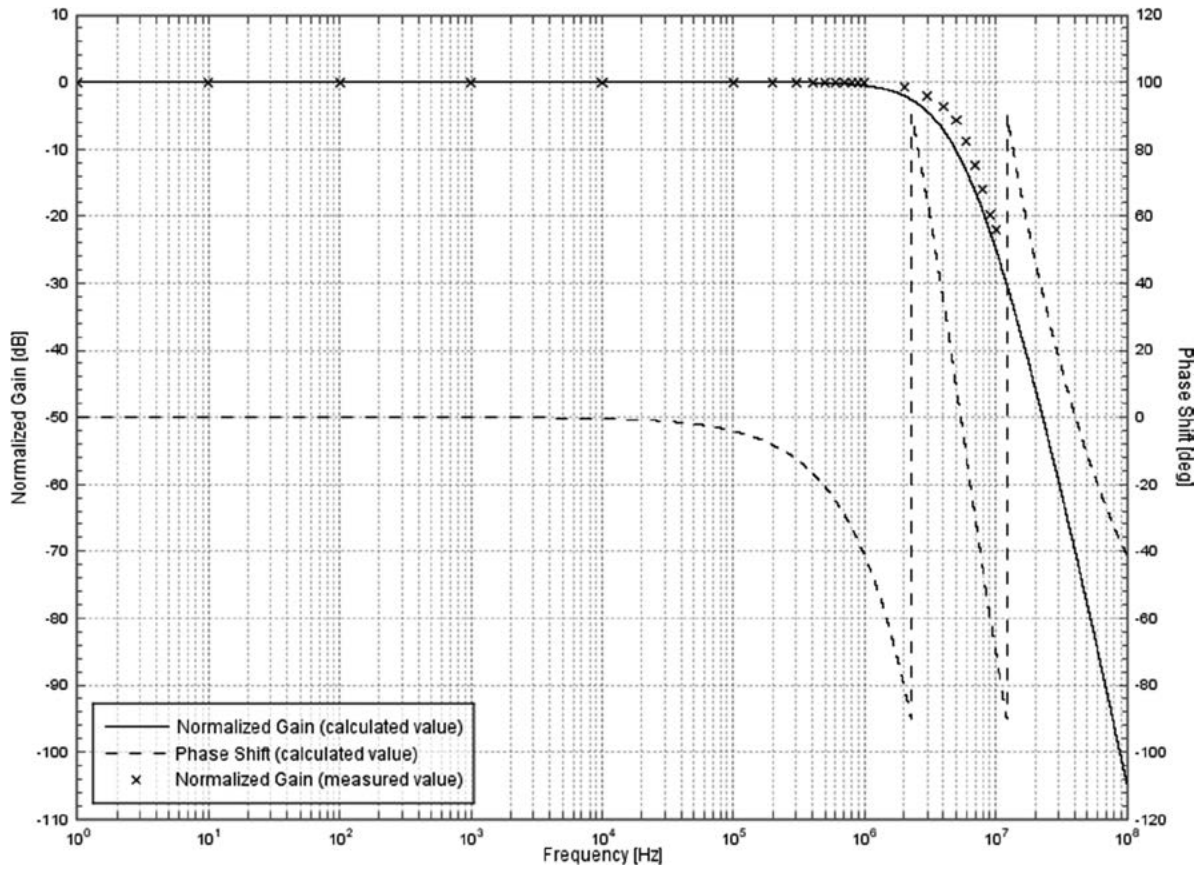


図3 絶縁アンプ A の規格化利得と位相シフト周波数特性. 実線がシミュレーション結果, ×印が実測値を表している.

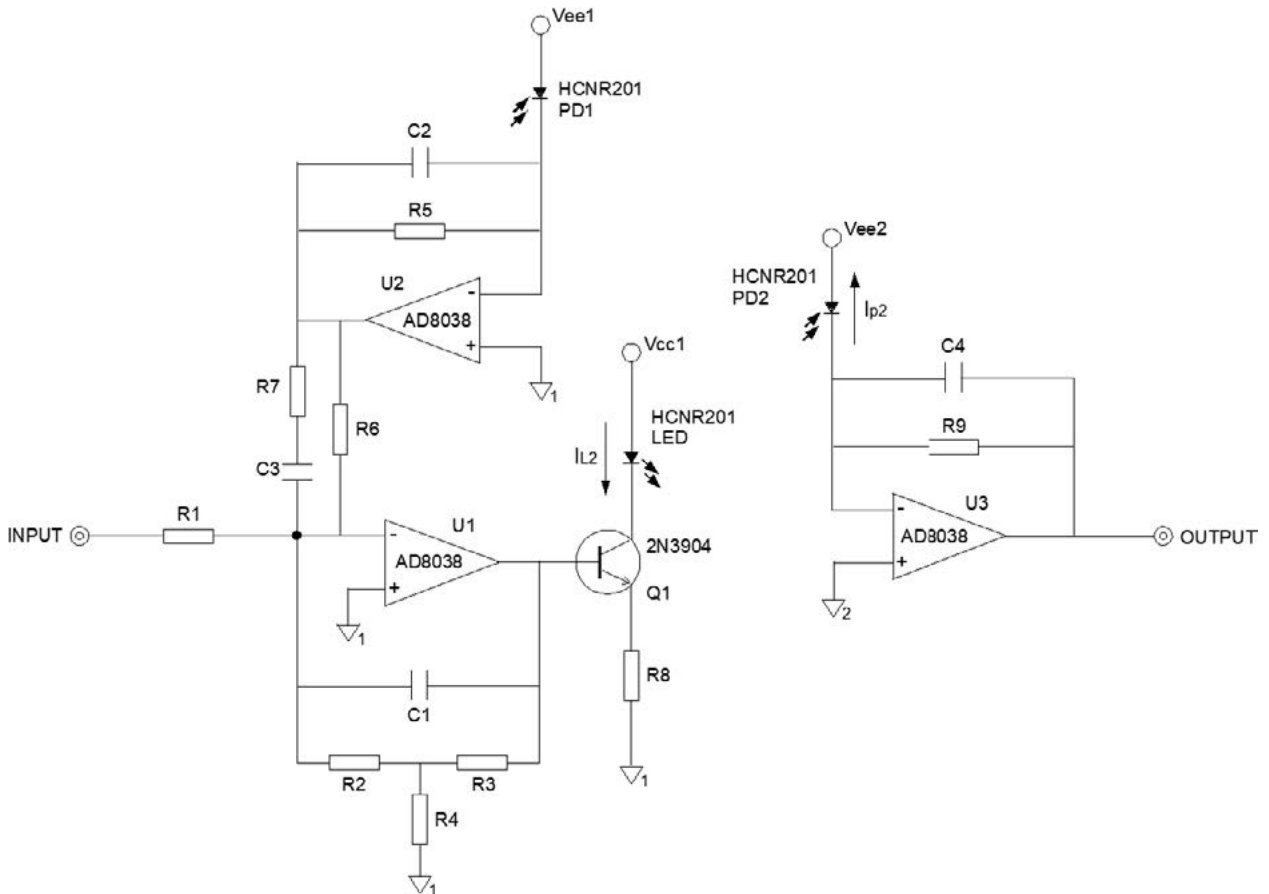


図4 絶縁アンプ B の回路図.

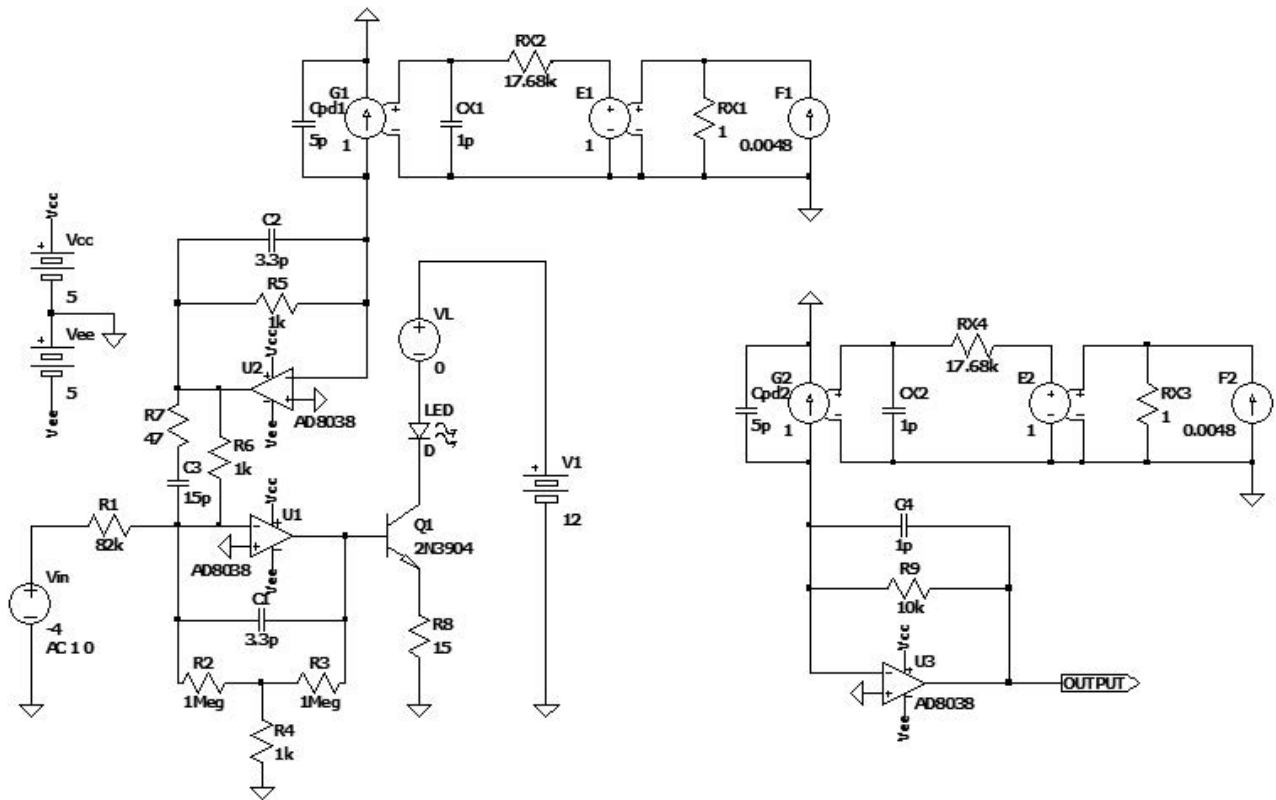


図5 絶縁アンプ B のシミュレーション回路.

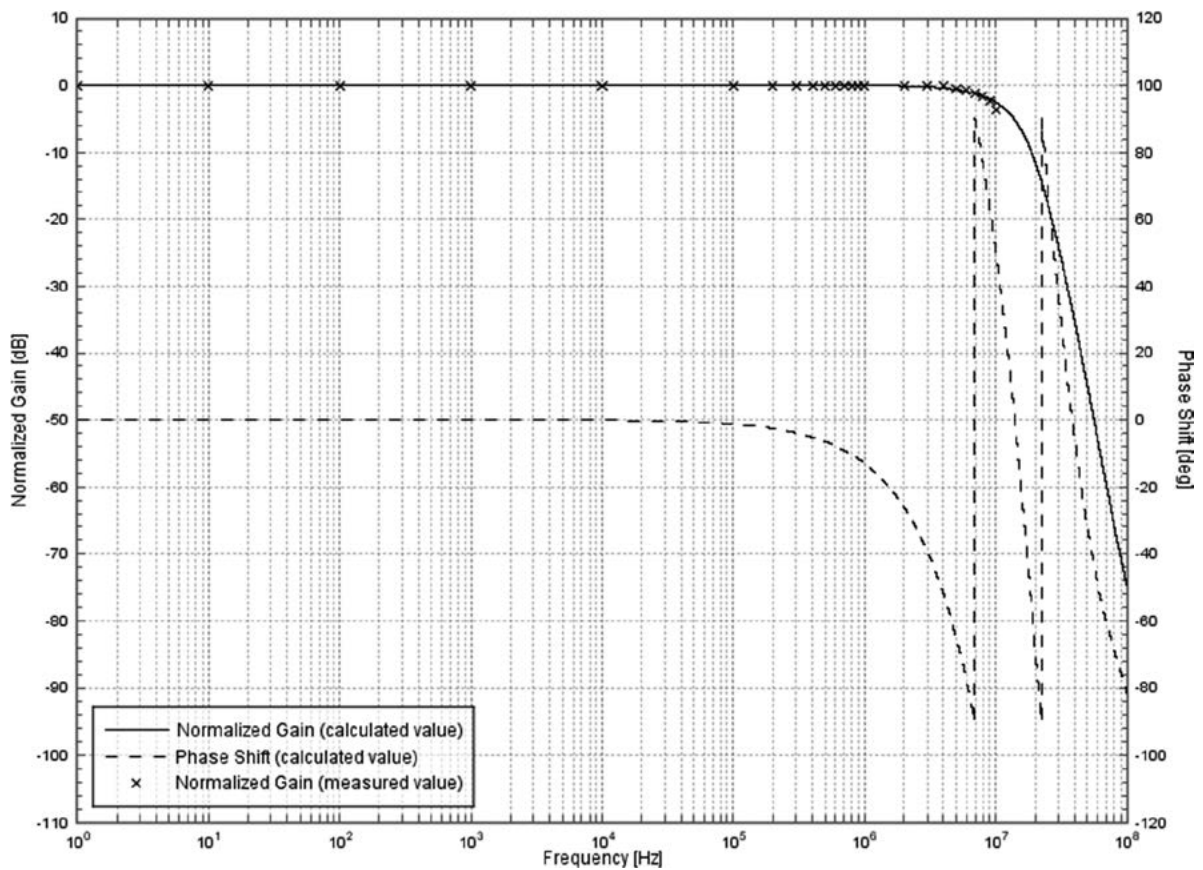


図6 絶縁アンプ B の規格化利得と位相シフト周波数特性. 実線がシミュレーション結果, ×印が実測値を表している.

測定値が図6の×印である。グラフからわかるように、絶縁アンプBの-3dB通過帯域は10MHzに到達することがわかる。

5. まとめ

本稿では、リニアフォトカプラHCNR201を用いた2種類の広帯域絶縁アンプAとBを説明した。絶縁アンプAとBの-3dB通過帯域はそれぞれ2.5MHzと10MHzである。特に絶縁アンプBについては、高速オペアンプにより、フォトダイオードの接合容量による影響を高域まで抑制し、フォトカプラの位相遅れによるフィードバックの不安定化を位相補償により抑制している。この結果、一般に市販されている絶縁アンプの典型的な周波数帯域1MHzよりも広い周波数帯域を実現している。広帯域絶縁アンプAとBは1チャンネルあたりそれぞれ1,000円と2,500円と安価である。

現在、我々は絶縁アンプBを24台製作して、実際にRELAX装置でのトカマクおよびRFPプラズマ実験に供している。初期データを見る限り、パルス放電ノイズに対しても十分な耐性も持つ。したがって、多チャンネルの絶縁アンプが必要なあらゆるプラズマ実験に適用できるだろう。

謝辞

本研究は、科研費・国際共同研究強化B(No. 20KK0063)と自然科学研究機構・核融合科学研究所・LHD計画共同研究(No. NIFS20KOAP035)の支援の下で行われた。

参考文献

- [1] Y. Nakajima *et al.*, AIP Advances **12**, 045015 (2022); Y. Nakajima *et al.*, J. Plasma Phys. **87**, 905870415 (2021).
- [2] T. Okada *et al.*, Phys. Lett. A **460**, 128617 (2023).
- [3] T. Inoue *et al.*, Fusion Eng. Des. **184**, 113285 (2022).
- [4] S. Inagaki *et al.*, Nucl. Inst. Methods Phys. Res. A **1036**, 166857 (2022).
- [5] T. Ninomiya *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **61**, S11009 (2022).
- [6] J. Cai *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **90**, 033502 (2019).
- [7] I.H. Hutchinson, Phys. Plasmas **15**, 123503 (2008).
- [8] G. Vayakis *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **74**, 2409 (2003).
- [9] H. Chuaqui, J.Phys. E **14**, 291 (1981).
- [10] A.J. Peyton. *Analog electronics with op-amps: a sourcebook of Practical circuits* (Cambridge University Press, 1993).
- [11] H. Tyagi *et al.*, AIP Conf. Proc. **2373**, 090002 (2021).
- [12] P. Horowitz. *The Art of Electronics* (Cambridge University Press, 1989).