

原点から考え、NDMに貢献する。

Non-Destructive Measurement

*Imaging Supersonic Laboratories Co.,Ltd.*

Home-page:<http://www1.kcn.ne.jp/~isl/> or <http://www.i-sl.co.jp>

(有) アイ・エス・エル

〒631-0063 奈良市帝塚山中町 1 2 - 7

+81-742-40-2345 FAX:+81-742-40-2346

Email:isl@kcn.ne.jp

## 送信回路の出力インピーダンスの測り方

送信回路はいろいろな内部形式のものがあり、弊社製品を含めなるべく多くの製品に適用できる方法をいかに記載する。想定外の内部形式のものもあるので、以下の方法の使用の際は、それぞれのメーカーに以下の方法で有効な結果が得られるか確認した方が良からう。

また、一般に半導体は飽和電流と言って、ある程度以上の電流が流せない性質がある。重い負荷の場合出力インピーダンスによる電流制限より、飽和電流による制限が重要な場合が多い。以下では飽和しない飽和電流以下での前提での話である。飽和電流はカタログに記載がないのでメーカーに確認するしかない。例えば 500V のパルサーに 20Ω の負荷がつながると、理想上は 25A の電流が流れることに成るが、多くの市販パルサーは 10A 程度で飽和するので、電圧がその分下がる。500V で 10A が飽和のパルサーでは 50Ω 以上の負荷での実験測定が前提になる。

一般的話として外部に抵抗を付けて、その抵抗による送信パルスの変化からインピーダンスを測定する方法もあるが、配線経路が増すため、リングングなどが増え正しい測定が難しい。現在の探傷器内のダンピング用抵抗は周波数特性が数百 MHz と高く、同じ基板上に配置された、送信回路とダンピング回路の配線経路が短いので、内部ダンピング抵抗を使った方が良い結果が得られる。ダンピング抵抗の入り切の機能が無い場合は、ダンピング抵抗代わりに周波数特性の良い抵抗を外部に 10cm 以内の同軸で接続する。

送信パルス波形の測定は、10MΩ の 200MHz 以上の帯域のプロープとオシロスコープで行う。帯域の広いプロープは、耐圧が低い、非破壊用機器の場合デューティーが低いので、多くの場合耐圧不足の問題ない。不安な場合は 2 個プロープを用意し、両方で計測した結果が同じであることを確認する必要がある。なお、プロープのトリマ設定は 10MHz 程度の方形波で予め行っておく。

探触子と並列にダンピング抵抗が繋がっている回路が従来は多かったが、デジタル化に伴って違う構成を取る事が多くなった。

送信電圧やパルスエネルギーが可変の機種では、これらの設定によってパルサーの出力インピーダンスが変化する。使う設定で以下の方法で出力インピーダンスを測らないと不味い。(余談：半導体素子は元来非線形素子で、オーディオ・アンプなどは工夫で直線性としている。仕様に書かれてない部分では非線形が現れる。知らない内に非線形回路として働いている場合もある。)

### スパイクパルサー型の場合

スパイク型パルサーはコンデンサーに蓄えた電荷を外部に放電する方法を取っている。パルスエネルギーはこのコンデンサーの容量を切り替えている。探触子へはパルスの先端の探触子半端長程度の軌間でエネルギーを供給し、それ以降は多くの場合逆に探触子から送信回路にエネルギーが逆流する。逆流すると感度が下がったり、超音波波形にリングングを生じる事から、使う探触子に合わせてパルスエネルギーを切り替える。送信パルスの幅相当は送信回路の内部インピーダンス相当となっていて、送信パルス以降は高いインピーダンスとなって、受信時に探触子からのエネルギーを送信回路の内部で消費するのを避けている。出力インピーダンスの測定では送信エネルギー切り替えは最大とする。パルスエネルギーを低くすると、容量成分を測ることになる。容量を測る良い方法が無い。カタログ値のパルスエネルギーから逆算する方が良からう。

海外メーカーの場合、安全性に関する規格の関係で、容量が小さめのコンデンサーを使っていて、その場合は以下の測定では、コンデンサーの容量分が出力インピーダンスの大半になってしまう場合がある。この場合 R2 はあまり小さくない方がより正しい内部インピーダンスが測定できる。

ダンピング抵抗が送信側にある機種と受信側にある機種がある。

精度を高める為には確認しておく必要がある。

#### 1) ダンピング抵抗が送信側の場合

1-1) 二探触子方とする。

1-2) 送信エネルギー切換がある場合は最大値とする。

1-3) ダンピング抵抗を最大とする。ダンピング抵抗の値を R1 とする。送信波形の高さを計測する。V1 とする。

1-4) ダンピング抵抗を最小とする。ダンピング抵抗の値を R2 とする。送信波形の高さを計測する。

V2 とする。

1-5) 送信回路の出力抵抗 (インピーダンス) は

$$R1 \times R2 \times (V2 - V1) / (R1V2 - R2V1) \quad (\text{式 1})$$

2) ダンピング抵抗が受信側の場合 或いは ダンピング抵抗がどちら側か判らない場合

2-1) ニ探触子方とする。

2-2) 送信エネルギー切替がある場合は最大値とする。

2-3) 送信波形の高さを計測する。V0 とする。

2-4) 一探触子法とする。ダンピング抵抗を最小とする。ダンピング抵抗の値を R2 とする。送信波形の高さを計測する。V2 とする。

2-5) 送信回路の出力抵抗 (インピーダンス) は

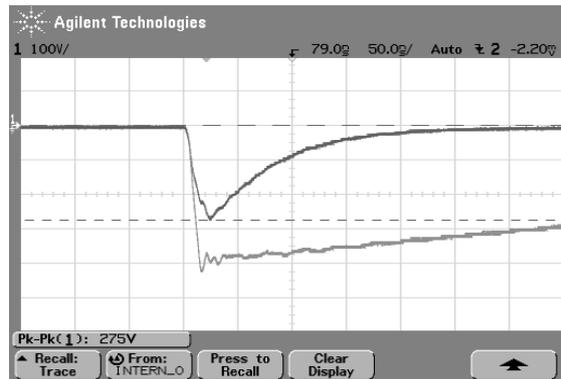
$$R2 \times (V0 - V2) / V2 \quad (\text{式 2})$$

なお、ダンピング固定の場合は外部に R2 を付け本式を適応する。

携帯型探傷器の場合の例

下図は携帯型探傷器 FlawMike の送信波形を、ダンピング抵抗は 500Ω と 50Ω の切替です。送信はの振幅は 400V (リングングは除く) と 275V と測定される。式 1 で計算すると 26.6Ω となる。

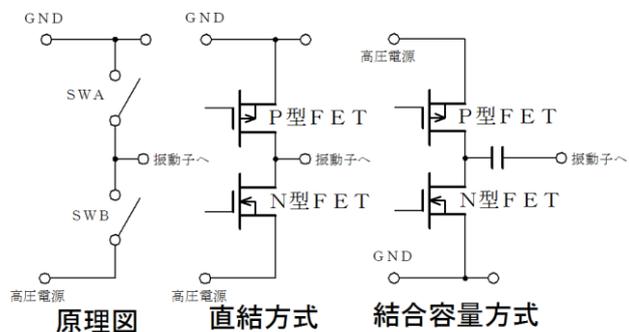
パルスの立ち上がりで測定したが、右図の中央の送信立下りから 100ns 目 (5MHz 相当) で計測すると振幅 380V が 95V に下がっている。この場合約 250Ω となる。5MHz 付近の周波数に関してはこれが結合容量を含む実出力インピーダンスとなる。波形先端で電圧測定すると、高い周波数での出力インピーダンスと一致するが、通常使われる 5MHz 程度では異なる。測定点は目的に従って、選択する必要がある。スクエア型等のパルサーに対しても、その内部構成によって同様のことが起きる。



### スクエア・パルサー型の場合 (バースト含む)

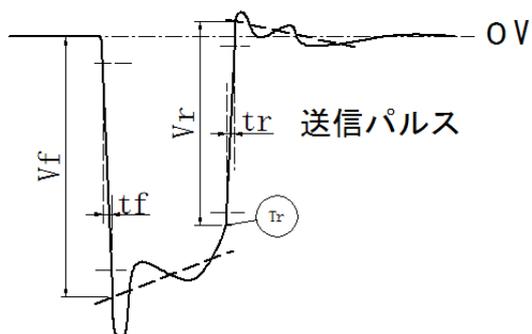
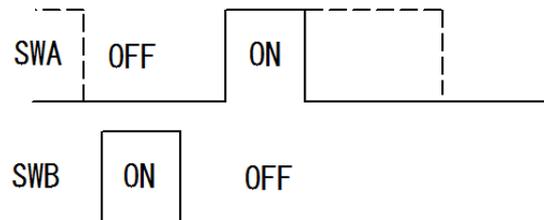
スクエア・パルサーは負の高電圧電源と GND (場合によっては正電圧) を探触子に印加する事により方形電圧を振動子に与える方法である。右図の SWB を入れて振動子に負の高電圧を印加し、振動子の半周期程度時間経過後 SWB を切って、少し経ってから SWA を入れる。こすることによって負の方形パルスが発生する。

SW は通常 FET で構成されているが、感電などの安全性を考えスパイクパルサー



同様に容量結合の場合もある。結合容量の場合は最初に SWA を入れっぱなしにしておいて、

コンデンサーに高圧を充電しておき、PRF 同期パルスのタイミングで SWA を開き、SWB を閉じる。半波長相当経過後 SWB を開き SWA を閉じる。結合コンデンサーは探触子の容量成分より大きなものを使うが、あまり大きくない方が送信直後の不感帯が減るため、メーカー設計者の適当な値を選んでいる。右図では探触子は FET やコンデンサーに接続しているように書かれているが、多くの市販製品では受信回路と送信後に分離されるような回路 (通常ダイオード) が挿入されている。このインピーダンスは一般的に送信パルスの振幅が大



きいので無視できる。

右図の様に SWA を閉じている期間 (ON) は、SWB より広くして、不感帯などを改善することもある。

SWA と SWB が同時に動作すると不味いので、両方のスイッチの動作間に隙間を入れていることが多い。また、この隙間は探触子の公称周波数と内部振動子の厚さが異なる為 (広帯域探触子では公称周期の半波長より短い)、振動子からの逆流が発生して送信感度低下をもたらすのを防ぐことが出来る。

スクエア・パルサーの SWA, SWB の素子のインピーダンスは異なるので、立下りと立ち上がりの両方の出力インピーダンスを測定する必要がある。図中  $V_f$  と  $V_r$  を測定する必要がある。測定はスパイク型に準じ、スクエア・パルス幅の設定は使用探触子と同じとし、計算は以下とする。

立下り側出力インピーダンス

$$R1 \times R2 \times (Vf2 - Vf1) / (R1Vf2 - R2Vf1) \quad (\text{式 3})$$

$$R2 \times (Vf0 - Vf2) / Vf2 \quad (\text{式 4})$$

立上り側出力インピーダンス

$$R1 \times R2 \times (Vr2 - Vr1) / (R1Vr2 - R2Vr1) \quad (\text{式 5})$$

$$R2 \times (Vr0 - Vr2) / Vr2 \quad (\text{式 6})$$

なお、 $V_r$  の起点  $T_r$  は観測しにくい場合もある。誤差もあるが、適当でよい。SWB の幅を広く設定すれば計測は容易になるが、使いたい周波数でのインピーダンスとの誤差は増える可能性がある。設定送信回路のインピーダンスは動的であって、SWA, B の制御信号が入ってから時間とともに連続的に変化する。この動的な変化を測定しようがない。以上の測定による出力インピーダンスは抵抗負荷の場合の目安であって、実際の負荷になる多くは容量性の探触子では違う結果になる事は想像できよう。この測定に依る、ほぼ同じ出力インピーダンスのパルサーが必ずしも同じ結果をもたらさない。30%とか、倍とかの差があると明らかな差が観測される。

方形バースト・パルサーはスクエア型パルサーと同じ方法で測定すればよいが、例えばバーストの 1 波目と 10 波目ではインピーダンスが異なる。

送信回路から探触子にエネルギーが供給されるのは、送信電圧波形の変化部分で、スパイクは立下り一回、スクエアは立下り 1 回と立ち上がり 1 回、バーストは設定により数回となって、エネルギーの供給は送信波数が多いほどチャンスが多くなる。しかし、一回の供給エネルギーは振動子に発生する圧電電圧と印加電圧の差に比例するので、振動子に圧電エネルギーが蓄積していない最初が一番多く、段々弱くなる。送信音圧で言えば、いくら送信波数を増やしても探触子の Q 値程度にしか音圧は上がらない。広帯域探触子は Q が 1.5 前後なので、スクエア以上の波数を加えてもあまり意味が無い。PZT の斜角の探触子の Q 値は 5 ~ 10 程度であるので音圧を上げたい場合は励振波数を増やせば数倍の音圧が期待できる。