HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	平行平板線路を用いたナノ秒パルス高耐電圧絶縁トランス
Author(s)	本間, 彰; 山崎, 初男
Citation	北海道大學工學部研究報告, 131, 37-41
Issue Date	1986-05-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41985
Type	departmental bulletin paper
File Information	131_37-42.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第131号（昭和61年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 131 (1986)

平行平板線路を用いたナノ秒パルス高耐電圧絶縁トランス

本間　彰　山崎　初男

（昭和60年12月27日受理）

Nanosecond-Pulse Isolation Transformer with a High Withstanding Voltage Composed of Parallel-Bar Transmission Lines

Akira HOMMA, Hatsuo YAMAZAKI

(Received December 27,1985)

Abstract

A novel nanosecond-pulse isolation transformer composed of paraallel-bar transmission lines was developed for the trigger system in an electron linear accelerator. To design it, the step-signal response of a transmission-line circuit modeling the transformer was analysed by using a reflection diagram. The insertion loss and time constant were estimated from the response analysis. The constructed transformer which can transmit 2 nsec wide pulses across a potential difference over 100 KV has a small rise time degradation (5% in 1 nsec rise time) and low insertion loss (−2 dB).

はじめに

パルス幅数十ピコ秒の電子ビームを発生することのできる線型電子加速器―シングルバンチ・ライナック―が出現し，17年余り経過した。この間，放射線物理，放射線化学を始めとし，多くの研究分野に於いてピコ秒領域の時間分解能を有する研究がなされてきた。近年その利用範囲の拡大につれ電荷量の増大，パルス幅の圧縮など，新たな性能の向上が要求されるようになってきている。本研究は，このようなシングルバンチ・ライナック実現のための基礎研究のうち電子入射部トリガー伝送方式に関する研究を行なったものである。

ライナックを用いてパルス幅数十ピコ秒の電子ビームを発生させるためには，電子銃と加速に用いるマイクロ波発生源の間にサブナノ秒オーダーの時間精度で同期を取る必要がある。さらに電子銃はその陽極電圧に等しい高電位部（～100 KV）に配置されるため，同期に用いるトリガー信号は絶縁結合素子を通じて供給しなくてはならない。現在，コンデンサーによる伝送方式，コアに同軸ケーブルを巻いたチョークコイルによる伝送方式等が主として採用されている[1]。前者は一般に既成のケーブル等を利用するため絶縁耐圧等の設計に対し制限を受け，後者は陽極電圧をパルス状に印加する必要があり，直流電位で電子銃を動作させることはできない。いずれの方式も充分な耐電圧を得ようとすると良好な伝送特性（パルスの立ち上がり保存性，挿入損失等）を得ることは困難である。近年，光ファイバーによる伝送方式の研究がなされている[2]。この方式

原子工学科　基礎原子核工学講座

では容易に高耐電圧を得ることができるが光－電気信号の変換系に存在するジッターは避けがたく，装置の複雑化，信頼性の向上等克服すべき問題点を多くかかえている。著者等は，上述の要求を満たすため直流耐圧 100 KV 以上，立ち上がり 1 ナノ秒以下，挿入損失数デシベルの性能を有するトリガー信号伝送絶縁結合素子を開発することを目的とし，伝送線路解析を基礎に平行平板伝送線路を用いたトランスによる伝送方式を考案，試作を行なった。

本報では動作原理，応答解析，実器の試作とその測定結果についてのべる。

動作原理と応答解析

トリガーパルス伝送用絶縁トランスを設計するにあたり，伝送時の波高減衰(挿入損失)，伝送できるパルス幅，すなわちトランスの応答の時定数を始めに評価しなければならない。以下応答解析をおこないこれらの諸量をもとめてみる[3]。

トランスは 1 次巻き線に相当する外側導体と 2 次巻き線に相当する内側導体を Fig. 1 のように配置したもので，信号はこの間の空間を伝搬する。(図中実線の矢印は電気力線を表す)

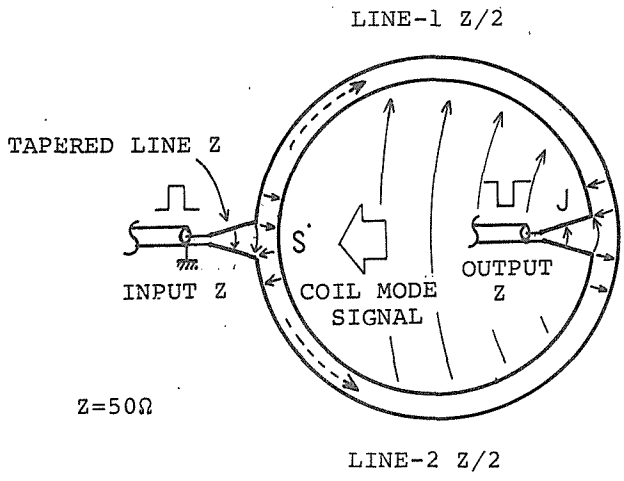

Fig. 1. Schematic of the isolation transformer using parallel bar transmission-lines.

このような構造をもつトランスの応答を伝送線路解析を用いて求めてみる。Fig. 1 で，内部インピーダンス Z の波源から進行してきた信号波は S 点でインピーダンス Z/2 の線路 1，2 へと直列分岐する。これらの信号は J 点で合流し，インピーダンス Z の出力端へと送り出される。さらに，2 次巻き線導体が構成する出力側の内部空間それ自身も短絡された線路を構成するためこの線路を並列分岐した出力信号は，S-J 間を往復し，入力端出力端に短絡の影響を生じせしめる。このように伝送線路以外の空間を伝搬する信号のことをコイルモード信号 (Coil Mode Signal C. M. S.)，この信号の伝搬する空間をコイルモード線路と呼ぶ。

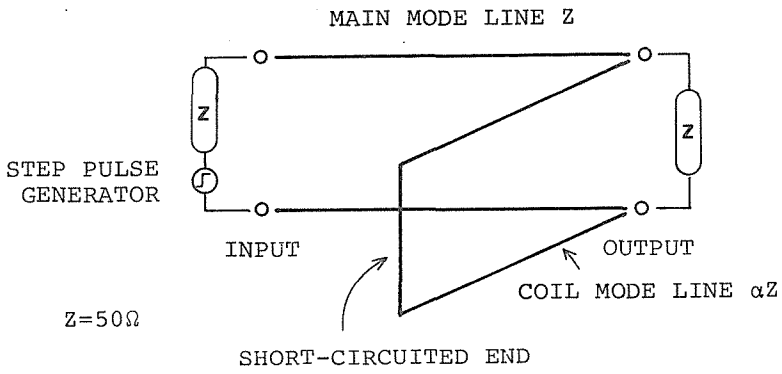

Fig. 2. Equivalent circuit of the transformer for the transmission-line analysis.

解析を容易にするため，C. M. L. のインピーダンスを一定なものとし，これを αZ，線路 1，2 を合成しインピーダンス Z の線路—これをメインモード線路 (Main Mode Line M. M. L.) と呼ぶ—として取り扱かう。このときトランスは各々の線路を理想線路

(非分散，非散逸)，各線路の接合部を点であると近似すると Fig. 2 のように出力端に短絡した線路を有する線路網として扱うことができ，INPUT-OUTPUT 間が M. M. L. OUTPUT−SHORTCIRCUITED END 間が C. M. L. にそれぞれ対応することになる。M. M. L. から出力端接合部を眺めたときの反射係数 Γ_1，透過係数 ρ_1，C. M. L. から出力端接合部を眺めたときの反射係数 Γ_2，透過係数 ρ_2 は次のようにして与えられる。

$$\Gamma_1=\frac{-1}{1+2\alpha} \tag{1}$$

$$\rho_1=\frac{2\alpha}{1+2\alpha} \tag{2}$$

$$\Gamma_2=\frac{1-2\alpha}{1+2\alpha} \tag{3}$$

$$\rho_2=\frac{2}{1+2\alpha} \tag{4}$$

さらに短絡端は完全反射，入出力端は M. M. L. に対し完全整合と仮定し，簡単のため，C. M. L. の長さは等しいものとし，信号の伝搬に要する時間を T と表わす。波高減衰率，時定数評価のため，入力端に単位ステップ電圧を与え，このときの出力端接合部における信号の様子を求める。

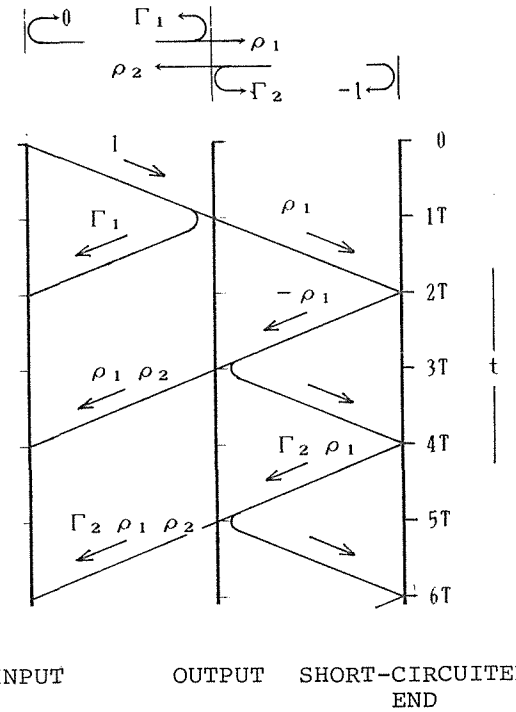

Fig. 3. Reflection diagram of voltage waves between the output and short-circuited end.

これをおこなうため Fig. 3 に示すリフレクションダイアグラムをもちいる。ここで 3 本の COLUMN はそれぞれ入力端—出力端—短絡端に対応し，それらの間の空間は，M. M. L., C. M. L. にそれぞれ対応する。さらに T を単位とした時刻を刻み，時間の経過を表現する。T=0 に入力端に与えた単位ステップ電圧の波頭は入射，反射，透過をくりかえし出力端へ達する。時刻 T における出力端での電圧 $E_0(T)$ は各々の時刻にダイアグラムの OUTPUT COLUMN に入射する電圧波に入射方向からの透過係数を乗じたものの総和となり，

$$\begin{aligned} E_0((2n+1)T) &= \rho_1(1-\rho_2(\sum_{m=0}^{n}(-\Gamma_2)^m) \\ &= \rho_1(-\Gamma_2)^n \\ &= \left(\frac{2\alpha}{1+2\alpha}\right)\left(\frac{2\alpha-1}{1+2\alpha}\right)^n \end{aligned} \tag{5}$$

と 2T ごとに階段状に減衰する関数となる。

つぎに(5)式を用い応答の時定数，減衰率を求める。2T 間における変化率は，

$$\frac{E_0((2n+3)T)-E_0((2n+1)T)}{2T} = \frac{-1}{(1+2\alpha)T}E_0((2n+1)T \tag{6}$$

となる。$E_0((2n+1)T)$ を連続関数として近似，これを $e_0(t)$ とおく。(6)式を微係数と見ると対応

する微分方程式は,

$$\frac{d}{dt}e_0(t)=\frac{-1}{(1+2\alpha)T}e_0(t) \tag{7}$$

となり，解は

$$e_0(t)=Ke^{-\frac{t}{\tau}} \tag{8}$$

$$K=\frac{2\alpha}{1+2\alpha} \tag{9}$$

$$\tau=(1+2\alpha)T \tag{10}$$

と求まる。ここでKは波高減衰率，τは等価的な時定数である。このことにより我々の考案したトランスのK，τはαとTによって決定されることがわかる。一般に，トランスの時定数は伝送するパルスの長さより十分大きくする必要があるので，損入損失−2 dB程度でパルス幅2ナノ秒のトリガーパルスを伝送しようとするとαは2以上，C. M. L. の線路長20 cm（比誘電率ε〜2.2の空間においてはT=1 ns）以上が必要となる。

トランスの構造と測定結果

トランスの基本構造はFig. 1に示した伝送線路により構成されている。1次巻き線に相当する外側導体と2次巻き線に相当する内側導体（直径300 cm）は各々銅の平板（幅75 mm）で，ポリエチレン（比誘電率ε〜2.2）を挟んで平行に配置（間隙7.5 mm）してある。これにより，1次巻き線と2次巻き線は最大絶縁耐圧130 KV，特性インピーダンス50 Ωの平行平板伝送線路を形成し，信号はこの間の空間を伝搬する。入出力端は特性インピーダンスを一定に維持し，かつ同軸ケーブル（RG-58 A/u）の寸法に近づけるため，50 Ωのテーパー線路としてある。さらに線路の端に放電防止用のリングをとりつけるなどの絶縁対策を施した後，トランス全体を絶縁オイルを満たしたケース内に収納してある。Photo. 1，Photo. 2参照

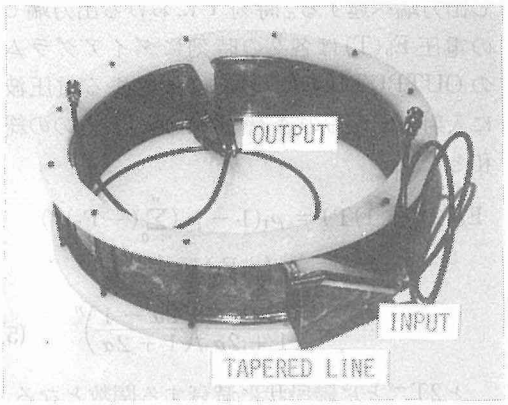

Photo. 1. Parallel-bar transmission-line isolation transformer. Outer and inner conductor respectivily corresponds to primary and secondary windings.

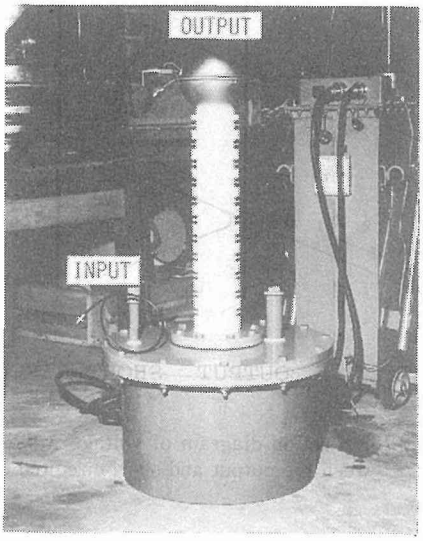

Photo. 2. Transformer encased in the tank filled with insulating oil.

Photo. 3 はトランスのパルス伝送特性測定例である。用いたパルス発生器はトランジスターのアバランシェ動作を利用したもので，立ち上がり時間 1 ns，半値幅 2.5 ns である。応答波形の測定はサンプリングオシロスコープ（帯域 3.5 GHZ）を用い，垂直入力信号のアッテネーションは 20 dB のアッテネータ(帯域 3.5 GHZ) 2 本を用いた。入力に対する波高減衰率 K は 0.81 と測定され，これにより挿入損失はおよそ−2 dB となる。また α は(9)式より 2.2 と求められる。C. M. L. の伝搬時間 T を 1.5 ns と見積もれば，(10)式より τ は 8.1 ns と求められる。

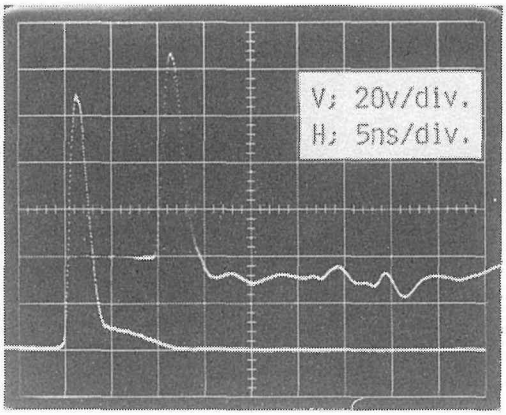

Photo. 3. Input pulse (lower trace) and output pulse (upper trace) of the transformer.

立ち上がり応答時間の劣下は時間軸の拡大測定により 5%以下と測定された。また耐電圧試験の結果は目標値の 100 KV には充分耐えることが確認された。しかし，絶縁材（ポリエチレンの絶縁耐電圧 18.2 KV/mm）より決定される設計最大値 130 KV に達しえず，その以前で放電をおこす。この原因は絶縁オイルのエージングを充分行なわなかったこと，オイル内に不純物混入の可能性があること，等によるものと考えられる。

おわりに

トリガー信号伝送の為の結合絶縁素子を開発するにあたり伝送線路で構成したトランスを考案，試作した。トランスの実時間応答を求めるため，入射，反射，透過の概念を用い，リフレクションダイアグラムを導入しそれによる解析結果をもとにトランスの設計をおこなった。こうして得られた試作トランスの諸特性は直流耐圧 100 KV，挿入損失−2 dB，立ち上がりの劣下は立ち上がり時間 1 ns のパルスに対し 5%で，当初の目標とした性能を満足する。しかし実用機として本トランスを考えるとき装置全体の大きさ，耐電圧に対する余裕などに問題を残す。これらの解決策として，絶縁材にシリコンコンパウンドなどを用い固体化を図ること，伝送線路の形式を変えること，等でより小型に，より高耐電圧に性能を向上させることが可能である。現在，この為の研究を進めている。[4]

参考文献

1) T. Fukushima, K. Hasegawa et al., Proc. 9th meeting on Linear Accelerator in Japan, July 1984, pp 30.
2) N. Kurosawa, Y. Hosono et al., Proc. 9th meeting on Linear Accelerator in Japan, July 1984, pp 33.
3) A. Homma, H. Yamazaki et al., Proc. 9th meeting on Linear Accelerator in Japan, July 1984, pp 39.
4) A. Homma, H. Yamazaki et al., Proc. 10th meeting on Linear Accelerator in Japan, Sep. 1985, pp 82.