

Double Feed Coupler for the Linear Collider

K. Watanabe, M. Oyamada, T. Nakazato, H. Matsumoto^{A)}, H. Akiyama^{B)} and K. Nishitani^{C)}

Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University

1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai, 982 Japan

^{A)} KEK, National Laboratory for High Energy Physics

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305 Japan

^{B)} Hitachi, Ltd. Hitachi Research Laboratory

1-1 Omika-cho, 7-chome, Hitachi-shi, Ibaraki, 319-12 Japan

^{C)} ATC Co., Ltd.

36-7 Namiki-cho, Hachioji-shi, Tokyo-to, 193 Japan

ABSTRACT

In generally, conventional cavity with single coupling iris has asymmetrical accelerating field which is caused by the coupling effect between a generator and a cavity. It is one of the main reasons to cause a beam deflection and emittance growth. A double feed type coupler has been proposed to improve the field symmetry which produced by two coupling irises as much as simple structure. The cavity was tested a maximum electrical surface gradient up to 118MV/m with a microscopic field enhancement factor β of 66 was obtained from Fowler-Nordheim plot. It was confirmed that the double feed type coupler has enough performance to use the high gradient accelerator.

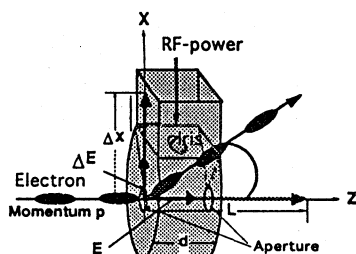
リニアコライダーのためのダブルフィードカップラー

1. はじめに

今日では e^-/e^+ リニアコライダーについての研究が世界各地で行われている[1]。リニアコライダーでは、今まで以上の高加速電場勾配が要求される。リニアックにおいてビームは加速管に生じる電界によって加速される。その加速エネルギーは主にクライストロンで生成され、伝送線路(矩形導波管)を通じて加速管に供給される。加速管と矩形導波管の結合部はカップラーによって接合される。通常のカップラー(1アイリス)では円筒形加速空洞に生じる電界は加速空洞の中心軸に対して対称になっていないことが知られている。(カップラー非対称問題)[2]この非対称性は加速ビームに悪影響を及ぼす。

$$\Delta x = \frac{eE\lambda d}{4\pi a p c} L \left[\Delta\phi \cos\theta + \frac{\Delta E}{E} \sin\theta \right] \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\phi$ は半径方向の位相非対称量、 $\Delta E/E$ は電界非対称率、 θ はビームと高周波の位相角を表す。ここでは電界強度 E 、アパーチャー半径 a 、管内波長 λ 、空洞の長さ d は図1に示した値を用いた。右辺第1項は電界位相の非対称性による項であり、第2項は電界振幅の非対称性による項である。高周波位相 θ は、この場合 $\theta = \pi/2$ である。計算の結果を図2に示す。ここでは、 L は1mとした。これはエミッタンス成長、BBU等の原因になり、高加速電界、ビームの低エネルギー領域で特に問題になる



d: the length of the cavity ; $d=30\text{mm}$
 a: the aperture radius ; $a=10\text{mm}$
 E: the electrical field ; $E=30\text{MV/m}$
 λ : the wave length ; $\lambda=105\text{mm}$
 ΔE : the variation of electrical field ; $\Delta E/E \sim 0.1\%$

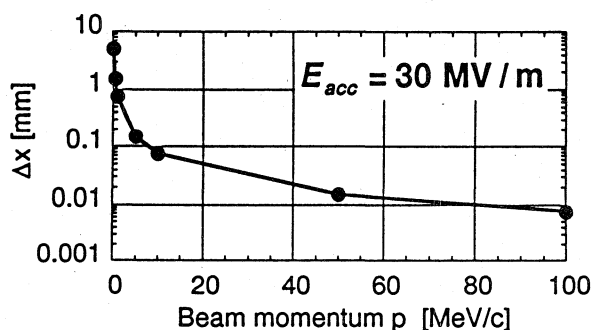


図2 結合空洞電界非対称性とビーム偏位置の関係

図1 カップラーでの電子ビームの性質

1アイリスカップラーの加速空洞の場合、電界の非対称性が存在すると仮定するとビームは図1のように力をうけ加速空洞の中心軸から離れてしまう。この中心軸からのずれ Δx は運動量を p 、ビームの進行距離を L とすると式(1)となる。

この問題の解決策の1つとして、カップラーを2アイリス構造にし、電界を対称にすることである。今まで2アイリス構造のカップラーは幾つか試作されたが、これらは複雑な構造であり量産に適していない[3][4]。今回試作した2アイリス構造カップラー「ダブルフィードカップラー」は可能な限り単純な構造で電界を対称になるように工夫した[5]。図3にその形状を示す。図3において f_0 、 β 、 Q_0 は低電力で測定した共振周波数、結合係数、無負荷 Q 値である。ア

イリスは加速空洞の上下に存在し、これらのアイリス管の距離は導波管の管内波長の整数倍(ここでは3倍)になっている。また下側のアイリスから短絡面までの距離は(1/4波長)+(1/2波長の整数倍(1倍))になっている。本論文ではダブルフィードカップラーの大電力試験について報告する。

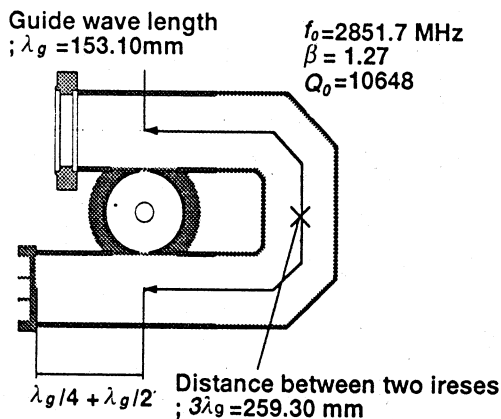


図3 ダブルフィードカップラー

2. ダブルフィードカップラーの基本原理

このカップラーを等価回路で表すと図4(A)のようになる。図4(A)においてアイリスはサセプタンスとして(2)式で表現される[6]。

$$b = -2 \tan \beta z \quad (2)$$

β : 伝搬定数 ; $\beta = 2\pi/\lambda_g$

z : 伝送線路上の位置

また、伝送線路のアドミッタンスは短絡面で終端されている場合、(3)式で表現される。

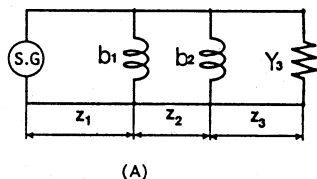
$$Y = -jY_0 \cot \beta z \quad (3)$$

Y_0 : 特性アドミッタンス

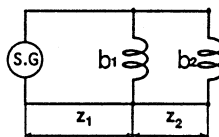
図4(A)の回路は(2)(3)式から(4)式で表現される。

$$Y = -2j \tan \beta z_1 - 2j \tan \beta z_2 - jY_0 \cot \beta z_3 \quad (4)$$

右辺第1項と第2項はアイリス間の距離を考慮すると同じ値になる。アイリスから短絡面までの距離が(1/4波長)+(1/2波長の整数倍)になっている場合伝送線路のアドミッタンスは無視出来るので図4(B)のような回路になる。アイリスの口径、厚さは上下とも同じなので、両方のアイリスから同じ電力が加速空洞に入力される。このため加速空洞の中心軸付近の電界は対称になることが期待される。



(A)



(B)

$$\begin{aligned} z_1 &= \lambda_g \\ z_2 &= (1+m)\lambda_g & (m=1, 2, \dots) \\ z_3 &= (1+m+n/2+1/4)\lambda_g & (n=0, 1, 2, \dots) \end{aligned}$$

図4 等価回路

3. 大電力試験

このカップラーは無酸素銅 (OFC) を使用して製造した。ダブルフィードカップラーの大電力試験はKEK-ATFにある高電界発生試験装置を使用して行われた[7]。この試験は高周波空洞に高電界を発生させ、耐放電性能及び暗電流を調査し、その性能を通常の空洞と比較する事を目的とした。

今回の試験では実験装置を図5のように構成した。試験中、真空を 10^{-10} Torr 台に保つため 200 l/s イオンポンプ2台と 100 l/s 高温活性化型NEGポンプ2台を用いた。真空度は2台のB-Aゲージで計測した。また残留ガス分析器(RGA)を使用し試験空洞内に存在する気体を分析した。高周波電力発生装置(クライストロン)は、周波数 2851.3 ± 0.1 MHz、パルス幅(フラットトップ) $2 \mu s$ 、繰り返し10Hzで運転した。高周波電力は高周波窓直前の方向性結合器の出力を通じてピークパワーメーターで高周波出力及び波形を測定した。暗電流は2ヶ所に設置した簡易型ファラデーカップ(F.C-1, F.C-2)に終端した電荷の平均電流をピコアンメーターで測定し、時間変化をオシロスコープで測定した。これらの波形を図6に示す。図6の(a)は空洞への入射波(クライストロン出力波)、(b)は空洞からの反射波、(c)はF.C-1で測定し暗電流の時間変化を表す。

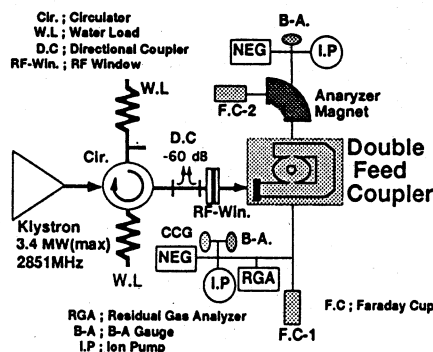


図5 実験装置

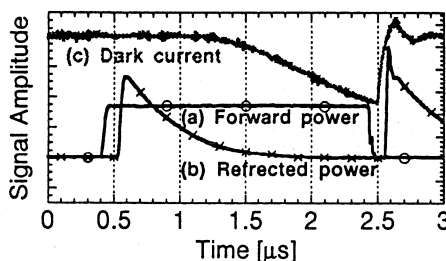


図6 高周波波形

暗電流はそれぞれ Fowler - Nordheim プロット(F-Nプロット) [8] 及び空洞の最大加速電圧の計測は暗電流の平均値を使用した。F-N プロットは図5のF.C-1で計測された電流と空洞の最大表面電界 E_s から求められる。暗電流の運動量は 90° 偏向電磁石を使用し計測され、偏向した暗電流はF.C-2で測定される。 E_s は空洞の蓄積エネルギーから計算し、空洞の入力電力 P を用いて次式で表される。

$$E_s [\text{MV/m}] = 68\sqrt{P [\text{MW}]} \quad (5)$$

各試験は高周波電力発生装置の最大電力 3.4 MW まで行った。この時、試験空洞に生じる E_s は(5)式より 118 MV/m である。本試験ではクライストロン出力の限界により E_s が制限されたため限界性能は評価出来なかった。この時の F-Nプロット、暗電流運動量分布、試験空洞内の残留ガスの測定結果をそれぞれ図7、図8、図9に示す。図7のF-Nプロットから電界増大係数 β は 66 である。更にF-Nプロットは直線であり、また図8の暗電流運動量分布はなめらかなので、空洞内でマルチパクターリングや放電が発生していない事がわかる。また図9より試験空洞中に残留するガスは主に質量数 2, 28 の物質であることがわかる。これらはそれぞれ H_2 , CO または N_2 に対応する。図7、9の結果は通常のカップラーと比較しても同様な値であることがわかった[9]。これらのことから、このカップラーをリニアックに導入した場合、電界の対称性の長所が十分に発揮出来ることは明らかである。

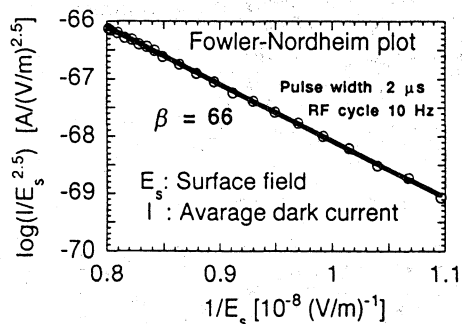


図7 Fowler - Nordheim プロット

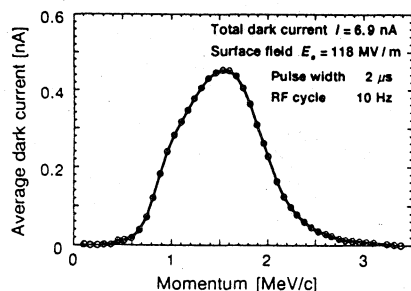


図8 暗電流運動量分布

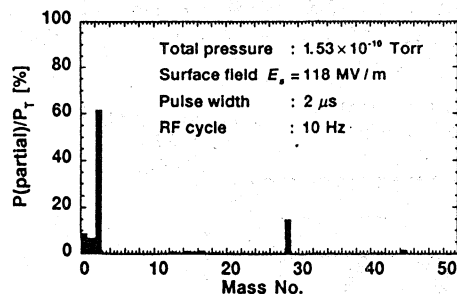


図9 残留ガスの存在率

4. ダブルフィードカップラーの応用

当初、ダブルフィードカップラーは、電子ビームのエネルギーが低く高加速勾配が必要とされるRF電子銃で使用するために開発を始めた。しかし、リニアコライダーのように長いリニアックでは、ビームのエネルギーは高くてもカップラーの非対称性によるビームダイナミクス上の問題が生じることが考えられる。このためRF電子銃で使用するだけでなく、リニアックの加速管に電力を供給するカップラーとして導入することも検討している。

5. まとめ

本試験によりダブルフィードカップラーはリニアックのカップラーに適用出来ることが明らかになった。このカップラーは大電力試験の後、摂動法[10]を用いて電界の対称性を調べる低電力試験を行う予定である。

謝辞

KEK-ATF グループの皆様には多大なご指導及び貴重な助言を頂きました。ここに深く感謝します。

参考文献

- [1] S. Takeda, Proceedings of the 1994 International Linac Conference, August 21-26, Tsukuba, Japan, 611-615
- [2] "The Stanford Two-mile accelerator", (1968) 144-148
- [3] H. Deruyter, et al., 1992 Linear Accelerator Conference Proceedings, 1992 August 24-28 Ottawa, Ontario, Canada 407-409
- [4] N. P. Sobenin, et al., Proceedings of the 1994 International Linac Conference, August 21-26, Tsukuba, Japan 74-76.
- [5] K. Watanabe, et al., Proceedings of International Linear Accelerator Work Shop '95, Mach 27-31, Tsukuba, Japan
- [6] J. C. Slater, "Microwave Electronics", (1950), 112-116
- [7] K. Nishitani, Proceedings of the 19th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 20-22, 1994, Tokai, Japan
- [8] J. W. Wang, "RF Properties of Periodic Accelerating Structure for Linear Colliders", SLAC-Report - 339, July 1989
- [9] H. Akiyama, et al., 本研究会
- [10] J. C. Slater, "Microwave Electronics", (1950), 80-82