

# 半導体用超高エネルギー重イオン注入器の研究開発

土屋和利<sup>1,A)</sup>, 畑 寿起<sup>A)</sup>, 山本和男<sup>A,B)</sup>, 林崎規託<sup>A)</sup>, 服部俊幸<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>東京工業大学原子炉工学研究所

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

<sup>B)</sup>理化学研究所

〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

## 概要

半導体用超高エネルギー重イオン注入器の 1st リニアックとして、高周波を用いた APF 収束方法と他の線形加速器に比べシャントインピーダンスが格段に高い IH 型加速空洞を取り入れた APF-IH 型線形加速器を提案した。今回は、共振周波数が 65MHz, 入射エネルギーが 20keV/u、出射エネルギーは 140keV/u であり、<sup>75</sup>As<sup>8+</sup> を最大 10MeV まで加速できるようになっている。以上の数値をもとに軌道計算等を行い、ドリフトチューブテーブルを作成し、1/2 スケールモデルを設計・製作した。このモデルを使った摂動法によるモデル測定の結果と、現在行っている Ansoft HFSS(High Frequency Structure Simulator)を用いた数値電磁場解析の結果を報告する。

## 1. はじめに

半導体生成過程において、必要なしきい値電圧や抵抗を作るために、イオン(不純物)注入が行われる。そこで我々は、不純物として用いられる<sup>75</sup>As<sup>8+</sup>, <sup>31</sup>P<sup>6+</sup>, <sup>11</sup>B<sup>2+</sup>等の重イオンを超高エネルギーまで加速できるようなイオン注入器の 1st リニアックとして、APF-IH 型の線形加速器を提案した。加速器内のビームの収束には、高周波による RF defocusing power を利用した APF (Alternating Phase Focus) 収束方法を採用し、加速構造は小型で、低エネルギー領域においてシャントインピーダンスが格段に高い IH 型のドリフトチューブ構造を採用した。

安定した APF-IH 型線形加速器を設計・製作するために、モデル測定の結果と HFSS によるシミュレーション計算の結果を比較・検討していき、IH 型空洞の特性を評価する。

## 2. HFSS

Ansoft HFSS は、高周波空洞内の電磁場の振る舞いを計算するためのソフトウェアです。このソフトは、空洞内の電磁場の振る舞いをより詳細に解析するために、ポストプロセッシングができるようになっている。また、このソフトでは以下のような計算が出来る。

- (1) 近接作用と遠隔作用における基本的な電磁場の解析、境界値問題
- (2) ポートインピーダンスや伝播定数の特性
- (3) S パラメーターの計算
- (4) 空洞の固有モードや共振周波数の計算

### 2.1 Eigenmodes

Eigenmode の計算では、空洞の共振周波数とその時の電磁場を求める事が出来る。HFSS では、Eigenmode は以下の行列方程式で計算される。

$$S\mathbf{x} + k_0^2 T\mathbf{x} = 0$$

$S$  と  $T$  は形状やメッシュに依存する行列である。 $\mathbf{x}$  は電場の解を示している行列である。 $k_0$  は各モードに対応する自由空間における波数である。この波数は、共振周波数に比例している。

$$f = \frac{k_0 c}{2\pi}$$

### 2.2 Quality Factor

HFSS における Q 値(Quality Factor)は近似値である。Eigenmode の場合、ポートやソースが制限されるため、計算された Q 値にはこれらのソースによるエネルギーロスが含まれていない。HFSS では、以下の式を用いて近似的な Q 値が計算されている。

$$Q = \left| \frac{\text{Re}(freq)}{2 \cdot \text{Im}(freq)} \right|$$

### 3. 共振周波数測定

#### 3.1 1/2 モデル測定

モデル測定においては、直径 1mm のアルミニウム摂動球を用いた摂動法により、共振周波数と電場を測定した。リッジの形状を変化させ、それぞれ共振周波数の測定を行った。荷電粒子の加速に適した電場になるようにリッジを調整した。摂動法の装置図を図 1 に示す。

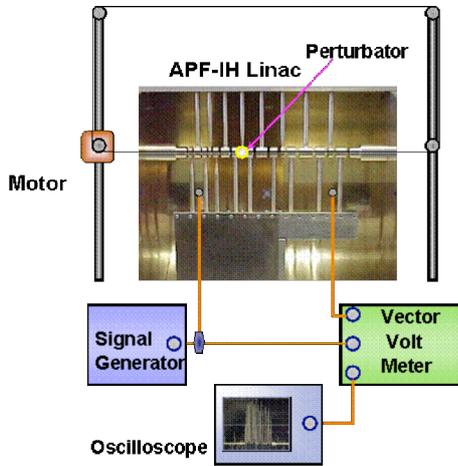


図 1 : 摂動法

摂動法により測定した共振周波数と電場の結果は以下の通りである。

πモード	設定値	測定値
共振周波数[MHz]	130	124.0162

表 1 : 摂動法による共振周波数

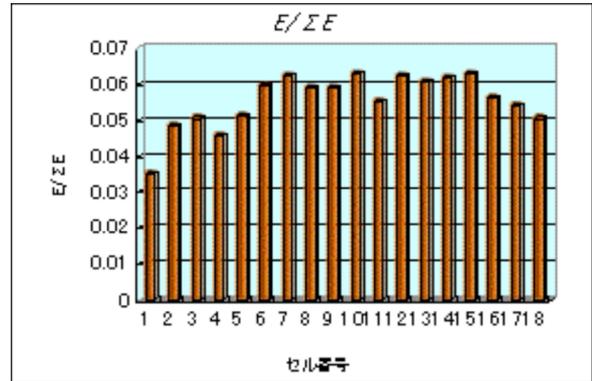


図 2 : 摂動法による電場測定

#### 3.2 HFSS による測定

現在、Ansoft HFSS を用いて高周波空洞内の数値電磁場解析を行っている。最初に、リッジやドリフトチューブがない円筒空洞共振器で計算を行い、次にリッジを挿入した場合、ステムとドリフトチューブを挿入した場合と分けて計算を行います。現在は、計算精度やコンピューターの限界との関連を見るために計算の基本パラメーター (mode 数,  $\Delta f_{MAX}$  等) を変えて最適値を探しながら、計算が進行中である。また円筒空洞共振器の共振周波数 ( $TE_{111}$ -mode) は以下の式を用いても計算が出来る<sup>[4]</sup>。

$$f = \frac{c_0}{2L} \sqrt{\left(\frac{L}{r}\right)^2 + 1.841^2} \quad (1)$$

ここで L: 空洞の長さ、r: 空洞半径である。この式を用いて算出した共振周波数の値と、これまでに結果が出ている数値計算による共振周波数の値 (一例) を以下に示す。また、参考までに HFSS のポストプロセスの図を示す。

共振周波数[GHz] ( $TE_{111}$ -mode)	
式(1)	HFSS
0.660282	0.660004

表 2 : 円筒空洞内の共振周波数

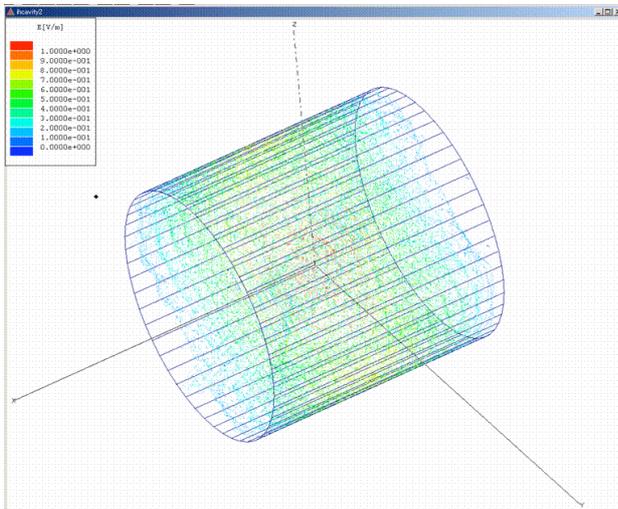


図 2 : 円筒空洞共振器

#### 4. まとめ

IH 型の加速器の問題として、ギャップ間の電場分布の平坦化という問題があり、これらは  $g/1$  比 ( $g$ : ギャップ長,  $1$ : セル長) を一定になるように調整し、更にリッジインデューサーを調整する方法がある<sup>[1][2]</sup>。しかし、すでに行われた摂動法によるモデル測定では、製作誤差が大きく影響したと思われ、 $g/1$  比に誤差が生じ、当初計算から求めた電圧・電場分布との比較が困難であった。そこで、HFSS を用いて数値計算を行い、本来の設計値での電場分布を求めると同時に、IH 型構造の特性を評価していく予定である。

#### 参考文献

- [1] U.Ratzinger GSI P.O. 11 05 52, D-6100 Darmstadt,FRG “INTERDIGITAL RF STRUCTURES” Proceedings of the 1990 Linear Accelerator Conference 525-529
- [2] R.E.Laxdal and P.Bricault TRIUMF, 4004 Wesbrook Mall, Vancouver, B.C.,Canada V6T 2A3 “DESIGN OF A DRIFT TUBE LINAC FOR THE ISAC PROJECT AT TRIUMF” <http://linac96.web.cern.ch/Linac96/Proceedings/Tuesday/TUP43/Paper.html>
- [3] U.Ratzinger GSI,P.O.11 05 52, D-6100 Darmstadt, Germany “The IH-Structure and its Capability to Accelerate High Current Beams” Proceedings of 1991 IEEE

- [4] B.Krientenstein,T.Weiland,THDarmstadt,GermanyU.Ratzinger, R.Tiede, GSI, Darmstadt,Germany S.A.Minaev, MEPhI, Moscow,Russia “NUMERICAL SIMULATION AND MODEL MEASUREMENTS OF THE NEW GSI IH-DTL” Proceedings of 1998 IEEE