

# 放射線生物実験用卓上誘電体イオン加速システムの研究

## STUDY ON DESKTOP DIELECTRIC ION ACCELERATOR FOR RADIOBIOLOGICAL EXPERIMENT

四宮権一<sup>#, A)</sup>, 上坂充<sup>A)</sup>, 神野智史<sup>A)</sup>, 吉田光宏<sup>B)</sup>, 小山和義<sup>B)</sup>, 夏井拓也<sup>B)</sup>

Kenichi Shinomiya<sup>#, A)</sup>, Mitsuru Uesaka<sup>A)</sup>, Satoshi Jinnno<sup>A)</sup>,  
Mitsuhiro Yoshida<sup>B)</sup>, Kazuyoshi Koyama<sup>B)</sup>, Takuya Natsui<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Engineering, University of Tokyo

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

### Abstract

Desktop size Dielectric Ion Accelerator (DIA) is being developed at The University of Tokyo and KEK in Japan. X-ray, proton beam, and carbon beam have been widely used in radiation therapy for cancer treatment in order to study the factors that decide the radiation therapy sensitivity. It is important to analyze the cellular response to these radiations. However, the biological irradiation studies for the heavy particle radiotherapy can be carried out in limited facilities. For that reason, we focused on developing a compact accelerator for the spread of the radiation therapy. Therefore we plan to develop a 500[keV]-1[MeV] acceleration system only several dozen centimeters in length which dedicated to the cell irradiation. This DIA consists of stacked Blumlein circuits which made from GaAs wafer with microstrip line. Blumlein circuit switched by photoconductive switch can be a multistage structure and can generate intense electric field in the interior of the acceleration tube. Current status of our research is that we are examining material property of the device composed of an integrated combination of Blumlein circuit with microstrip line, the photoconductive switch and the acceleration tube. At the meeting we report on this progress.

## 1. はじめに

東京大学・KEK では卓上スケールのファイバーレーザースイッチ型誘電体イオン加速システムの開発を行っている。日本国内において癌治療患者数は年々増加しているが、癌に対する主要な治療法の一つである放射線療法において、照射を行う際のリスクデータが不足しており、治療効率を向上させるため細胞の損傷と修復のメカニズムを明らかにする必要がある。しかし放射線生物学実験は限られた大型施設でしか行えなく、建設には巨額の費用が掛かることが問題となっている。そのため本加速器の先行研究である Lawrence Livermore National Laboratory の Dielectric Wall Accelerator が放射線治療用として開発されており 200[MeV]Proton/2meters のスケールとなっている[1]。一方で本研究は放射線生物応用のための卓上スケール誘電体イオン加速システムの開発を目的とし、従来の重粒子加速施設と比べ、小型で持ち運び可能な装置とすることを目標とする。そして将来的には DNA の損傷・修復をリアルタイムで観察することが出来る装置と併用し、重粒子線治療の普及や放射線生物学実験への応用を目指すものである。本加速器の加速対象はカーボンイオンとし、ブルームライン回路によって構成された十数センチの加速管から 500[kV]~1[MeV]の加速を目標とする。本発表では加速器の構造、加速実験の準備状況及び誘電体基盤である GaAs の特性実験の結果について発表する。

## 2. 本誘電体イオン加速器の構成

### 2.1 ブルームライン回路型加速器

本誘電体イオン加速器では加速管内に電界を発生させる素子としてブルームライン回路を用いる。一般に、ブルームライン回路は Figure 1 に示すように 2 本の同軸ケーブルを接続し、前後の同軸ケーブルの外導体の間もしくは内導体の間にインピーダンス整合をした抵抗を設置する。ブルームライン回路の特性として以下が挙げられる。

- ① 出力電圧を得る際に抵抗を用いず開放端にすると充電電圧の 2 倍を出力することが出来る。
- ② ブルームライン回路は Figure 3 に示すように多段構造にすることが可能で、1 段の回路×段数分の電圧を昇圧し出力することが出来る。

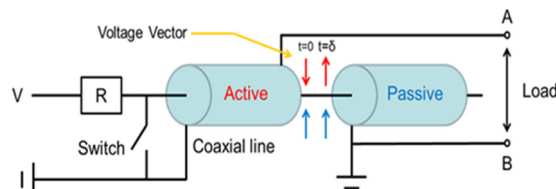


Figure 1: Blumlein circuit (Coaxial cable).

$$\tau = 2L\sqrt{\epsilon_r}/c \quad (1)$$

$$V_0 = 2VZ_L/(Z_L + 2Z_0) \quad (2)$$

<sup>#</sup> Kenichi.Shinomiya@nuclear.jp

式(1),(2)では出力パルス幅  $\tau$ 、出力電圧  $V_0$  を示してあり、 $L$  は伝送線路長、 $c$  は光速、 $\epsilon_r$  は誘電体の比誘電率、 $V$  は充電電圧、 $Z_0$  及び  $Z_L$  は同軸ケーブルと抵抗のインピーダンスを示す。

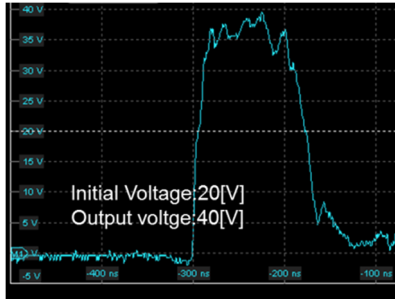


Figure 2: Output voltage from Blumlein circuit.

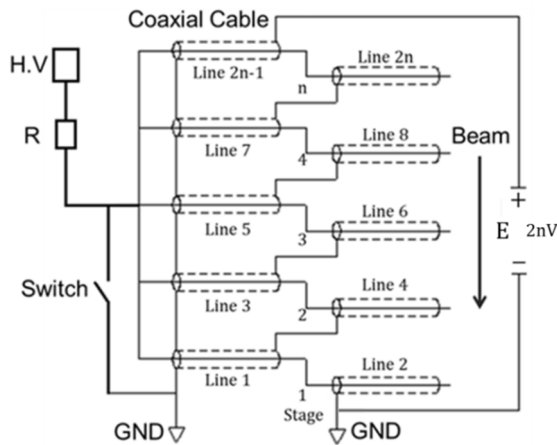


Figure 3: Multistage Blumlein circuit [2].

## 2.2 GaAs ウェハ

本加速器では、これまでに説明したブルームライン回路を構成する同軸ケーブルの代わりに半導体素子である真性半導体 GaAs ウェハを用いる。この基板にマイクロストリップラインを作製することで同軸ケーブルと構造的に同じにする。加工を行った GaAs を Figure 4 に示す。現段階で金属はアルミニウムを使用しており、構造としては裏面のアルミは同軸ケーブルの外導体に相当しグランドとなる。中間の誘電体は GaAs 基盤そのものとなり、内導体は表面のマイクロストリップラインとなる。

伝送線路の構造に関して、(1)式で示したように、ラインを長くするに伴いパルス幅を広げることが可能となる。光伝導スイッチは早い立ち上がりがあるが、多段式ブルームライン回路を組み昇圧を行うと、パルスの重ね合わせの際の微妙なズレにより立ち上がりに通常より時間を要する可能性がある。よって伝送線路を可能な限り長くすることで、長いパルスの平坦部を得ることを目的としている。

本研究で設計しているウェハの長所は、基盤そのものが光伝導スイッチの役割を果たすため、外部にスイッチング素子を用いる必要がない。また、ブ

ルームライン回路をメアンダ構造にして、末端に加速管を付けることで、大幅に形状を小型化することができる。他にも素子の加工が容易でコストが低いことも挙げられる。

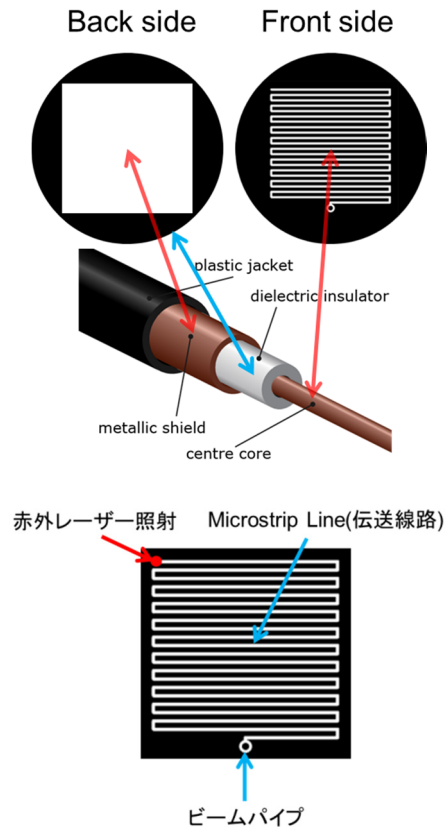


Figure 4: Structure of GaAs wafer.

## 2.3 光伝導スイッチの利用

本加速器ではブルームライン回路のスイッチングに光伝導スイッチを用いることで、MOSFET などと比較し、高い耐圧と出力パルスの早い立ち上がりを実現することができる。光伝導スイッチは誘電体が金属に挟まれ電圧が印加されている状態で、バンドギャップ以上のレーザーを照射することで、中に電子・正孔対を生成し、それらが電極へ向かう際に電流が流れスイッチングする。通常、光伝導スイッチは昇圧回路の外部に設置するが、本加速器ではマイクロストリップラインと GaAs ウェハ基盤により、光伝導スイッチの構造が出来ているため、基盤に直接レーザーを照射することでスイッチングを行うことが可能となっている。

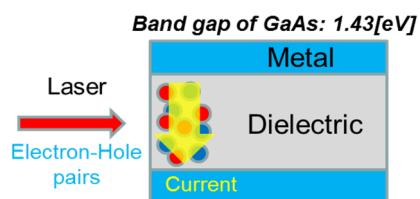


Figure 5: Structure of photoconductive switch.

## 2.4 本加速器に適している素材

以下の Table 1 には現在本加速器に用いる誘電体として検討を行っている材料が示してある。本加速器で使用する場合、Max E-field の値の高い材料を選択することで、誘電体基盤に印加する電圧を上げることが出来、積層するブルームライン回路段数を少なくし加速器を小型化することが可能となる。Electron Mobility が高い場合はキャリアが生成した後の移動速度が速くなることから、出力電圧も矩形波に近い形にすることが出来る。仕事関数に関しては、基盤に電圧を印加する際の電子の移動を妨げるショットキー接続にするために work Function の高い材料が適している。

Table 1: Property of Dielectric Materials [3]

Propaties	Si	GaAs	4H-SiC
Band Gap (eV)	1.12	1.43	3.26
Max E-field (kV/cm)	250	300	2200
Dark Resistivity (Ohm-cm)	$2 \times 10^7$	$2 \times 10^3$	$1.0 \times 10^{11}$
Electron Mobility ( $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ )	1300	8500	800
Hole Mobility ( $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ )	480	400	120
Dielectric Constant ( $\epsilon_r$ )	11.8	12.8	10
Thermal Cond (W/cm-K)	0.55	1.4	4.9
Work Function (eV)	3.7	4.8	

## 3. 実験と結果

### 3.1 GaAs ウェハの耐圧測定

厚み 600[ $\mu\text{m}$ ]の GaAs ウェハにマイクロストリップラインを模擬したラインを 0.6[mm]間隔で配置し、300[nm]のアルミスパッタを行った。アルミの周囲に銅箔テープを張り、ワイヤーボンディングで繋げ、外部端子と接続をした。電源は基盤を加熱させないためパルス充電を使用し、電圧が印加されている間にレーザーを照射し耐圧を測定する。

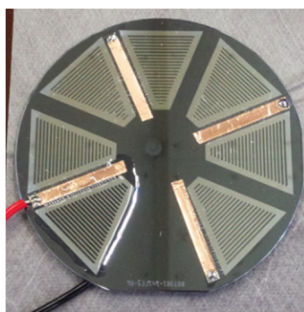


Figure 6: GaAs wafer for breakdown experiment.

Figure 7 に結果を示す。ウェハの厚みから最大耐圧は 15[kV]となっているが、本実験では 4.5[kV]程となった。放電箇所を調べたところ、ワイヤーボンディングの部分や不純物が付着している箇所から放

電していたことが確認できた。よって、まだウェハ自体の最大耐圧に達していないことから、紫外線硬化樹脂のコーティング等を実施し、今後改めて耐圧実験を行う。



Figure 7: Result of breakdown experiment.

## 4. まとめと今後の予定

本研究では放射線生物実験用の卓上スケールの誘電体イオン加速器を検討しており、今回は電界を発生させる素子である GaAs 等のウェハの加工を行い耐圧の測定試験を行った。

本加速器は最終的に Figure 8 に示す形状の設計を行う。冷却器の中に多段式ブルームラインが積層され、外部からカーボンイオンを注入し、加速管内の移動速度に合わせ、ファイバーレーザーでユニットごとにスイッチングを行い多段に加速を行う。

今後の予定としては、ウェハでの多段ブルームライン回路を作製し、出力波形の測定とメアング構造のマイクロストリップラインで起こる反射について検討を行う。その後、ウェハ数枚でのプロトタイプ誘電体イオン加速器を作製し加速実験を行う。

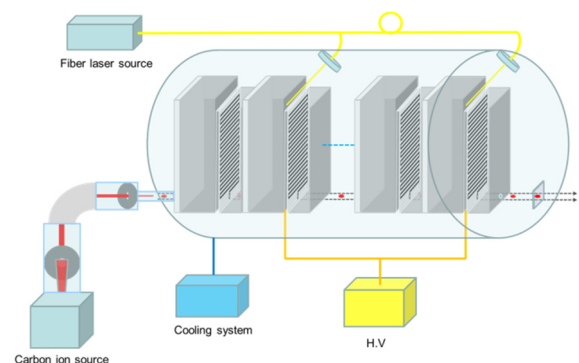


Figure 8: General view of dielectric wall accelerator.

## 参考文献

- [1] Yu-Juan Chen, "High Gradient Dielectric Wall Accelerators", Muon Collider Design Workshop, December 8-12, 2008.
- [2] Jose O. Rossi, Member, IEEE, Joaquim J. Barroso, and Mario Ueda., "Modeling of Wound Coaxial Blumlein Pulsers", IEEE Transactions On Plasma Science, VOL. 34, NO. 5, October 2006.
- [3] J. S. Sullivan, "Wide Bandgap Extrinsic photoconductive switches", LLNL-TH-523591, January 20, 2012.