

SEMICONDUCTOR IRRADIATION APPARATUS WITH NEUTRONS AND IONS

Takahiro Makino*, Mamoru Baba, Naoya Hirabayashi, Masayuki Hagiwara, Toshiro Itoga,
So Kamada, and Hiroyuki Okamura**
Cyclotron and Radioisotope Center, Tohoku University
Sendai, 980-8578

Abstract

In order to provide a semiconductor irradiation test facility for cosmic ray induced soft error and hard error of modern semiconductor devices which are becoming serious problems due to its high density. We have installed semiconductor irradiation apparatuses with neutrons and ions.

The neutron fields were installed using the 4.5MV Dynamitron accelerator at FNL(1-15 MeV), faculty of engineering, and a AVF cyclotron at CYRIC. Low energy mono energetic neutrons are obtained from the ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$, ${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$, ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$, ${}^3\text{H}(d,n)$ reactions by the Dynamitron and 20-70 MeV neutrons are obtained with newly-developed intense ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ quasi mono energetic neutron source. In the case of ion irradiation, the apparatus allowed for the irradiation of proton and heavy ions (LET are 1-40 MeV/mg/cm²) by the cyclotron. This paper describes performance and present statuses of semiconductor irradiation apparatuses.

1. 背景

宇宙放射線による半導体のソフトエラーや損傷が、その集積度の高まりとともに大きな問題となっており、その試験を行うための設備が必要とされている。中性子の場合には、地上レベルにおいてもその影響が顕在化しており、半導体への放射線影響を調べるために、試験設備の役割はますます重要となっている。

CYRICのAVFサイクロトロンから得られる数10 MeV/uの軽重イオン^[1]はソフトエラー試験に有用であり、その試験に適したビーム条件を達成するための照射用ビームラインを設置した^[2]。

また、工学研究科FNLのダイナミトロン加速器^[1]とCYRICのAVFサイクロトロン^[1,3]を用いることによって0.2 MeVから80 MeVに亘って単色または準単色の中性子を発生させることができ、中性子によるソフトエラーの実験に用いている。この広い範囲に亘る中性子源は世界的にも希であり、ソフトエラーのエネルギー依存性を調べる上で有効に用いられている^[4]。このようにイオンと中性子両者による照射試験が可能な施設は世界的にもごく限られている。以下に設備の概要と試験内容を紹介する。

2. 中性子照射設備

1) 1 - 15 MeV 中性子[1,5]

このエネルギー範囲の中性子は、工学研究科 4.5 MVダイナミトロン加速器からの陽子、重陽子ビームと ${}^7\text{Li}$, D , ${}^3\text{H}$ との中性子生成反応を用いて発生させている。これらの中性子源は中性子検出器やスペクトロメータの特性測定用に開発したものでビーム強度はそれほど強くはないが、表に示す種々のエネルギーにおいて、単色で強度のよく知られたビームを得ることができる[Table 1]。

半導体メモリの微細化は、ソフトエラーに対する閾値が低下をもたらししているが、これらのビームはソフトエラーのエネルギー依存性特に閾値の推定に有効に利用されている^[4]。エネルギーによって異なるが、これらの中性子ビームによって数時間の照射で必要なソフトエラーのイベント

数が得られている。

Table 1 工学研究科 4.5 MV ダイナミトロン加速器における中性子源とその強度

中性子エネルギー (MeV)	中性子源反応	中性子束* (n · cm ⁻² μA ⁻¹)
0.25	${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	1.0×10^4
0.55	${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$	3.2×10^4
1.0	${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$	1.2×10^4
2.0	${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$	2.2×10^4
5.0	${}^2\text{D}(d,n){}^3\text{He}$	2.2×10^5
15.0	${}^3\text{H}(d,n)\alpha$	8.0×10^4

*ターゲットから 10 cm における値

Present address

* ISAS/JAXA Sagami-hara, Kanagawa

E-Mail: t.makino@isas.jaxa.jp

** RCNP/Osaka University

E-Mail: okamura_@rcnp.osaka-u.ac.jp

2) 15 - 80 MeV 中性子[1,3]

15 MeV ~ 80 MeVの中性子はCYRIC AVFサイクロトロンを用い、 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ によって得ている。

20 MeV程度以上になると純粋に単色の中性子源は存在せず、最も単色性の良い ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 中性子源の場合でも、Fig.1 に示すように目的とするピーク中性子の他に多体崩壊による連続中性子が存在する。これらによるソフトエラーを実験または計算によって除去する必要があるが、この中性子源はソフトエラーのエネルギー的な振舞を知るのに不可欠である。

従来CYRICでは他コースにおいて、標準的な配置の ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 中性子源^[3,4]を用いてきたが、この配置では照射位置がターゲットから3~3.5 m離れるので、この点での中性子束強度は $10^4 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度となり、ソフトエラーの実験にも十分ではなかった。

そこで、Fig.2 に示すような配置によって照射位置をターゲットから70 cm程度まで近づけることのできる新しい準単色中性子コースを開発した。これによって入射ビームあたり従来より10倍以上の中性子強度を得ることができると、このビームコースはサイクロトロンからほぼ直線に近いためビーム輸送も容易であり、これらによって $10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ を越える単色中性子としては世界最大クラスの中性子強度が得られる。特性測定の結果^[5]、半導体のソフトエラー試験においては十分利用でき、従来のコースより大幅に照射試験時間を短縮することができ、従来困難であったDRAMについても試験が可能となっている^[6]

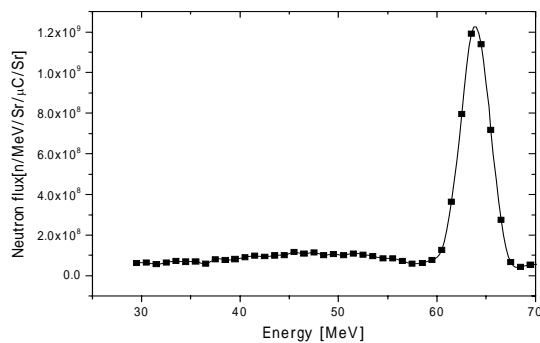


Fig.1 実測した準単色中性子スペクトル

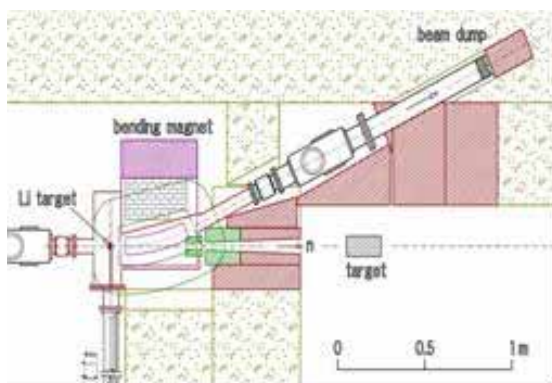


Fig.2 ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ 大強度中性子源

3. イオンビーム照射設備

イオンビームについても半導体照射試験を効率よく行うためにサイクロトロンからの陽子及びC, N, O, Ne, Ar, Krなどの重イオンビームを用いて、下記のような仕様を満たす照射装置を設計・製作した^[2]。その模式図をFig.3に示す。

- 1)ビーム強度：陽子の場合 $> 10^7/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$, 重イオン $> 10^4/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度
- 2)ビーム強度がデバイス面上で均一である(2.5 cm直径)
- 3)照射しながら実時間でビーム量が測定可能である,
- 4)ビームエネルギーが容易に可変である,
- 5)空気中照射が可能である。

陽子の場合には、左方から入射したイオンビームを散乱体(Diffuser)によって平坦化し、アパチャーを通してビームモニタ・用二次粒子モニター(SEM)に入射させ、さらに減速体(Degrader)を経て窓(Kapton)から空気中に取り出し、半導体サンプルに照射する。半導体はXYRの自由度を持つ3次元ステージによって交換または回転しながら照射することができる。SEMの出力をピコアンメータによって計数し、その下流の外部ファラデーカップとの比からSEMの感度校正を行っているのでSEMによって陽子の入射量をリアルタイムで測定することができる。

ビームのプロファイル(一様性)はImaging Plate(IP)を用いて測定している。陽子の場合、ビーム強度が強いのでCu箔を放射化させそれをIPに投影する方法を用いていたが、読み出し方を工夫することによって直接照射によっても測定が可能である。

陽子の場合、減速体をビームに対して傾ける機構を追加することによって一度のビームタイム中に70~10 MeV間で約10点のエネルギーを任意に選んで照射できる。重イオンの場合、カクテルビームを利用することによってC, O, Ne等のビームを照射し、LETの異なるイオンについて試験できる。

従来は重イオンのモニタが困難なため、実際の照射試験にはあまり利用できなかったがSegmented-SEMを導入することによってビーム通過時のエネルギーロスなくビームをモニタでき、ビーム軸のモニタも可能となり、陽子照射試験と同様にルーチ的な照射試験に利用されている^[6]。

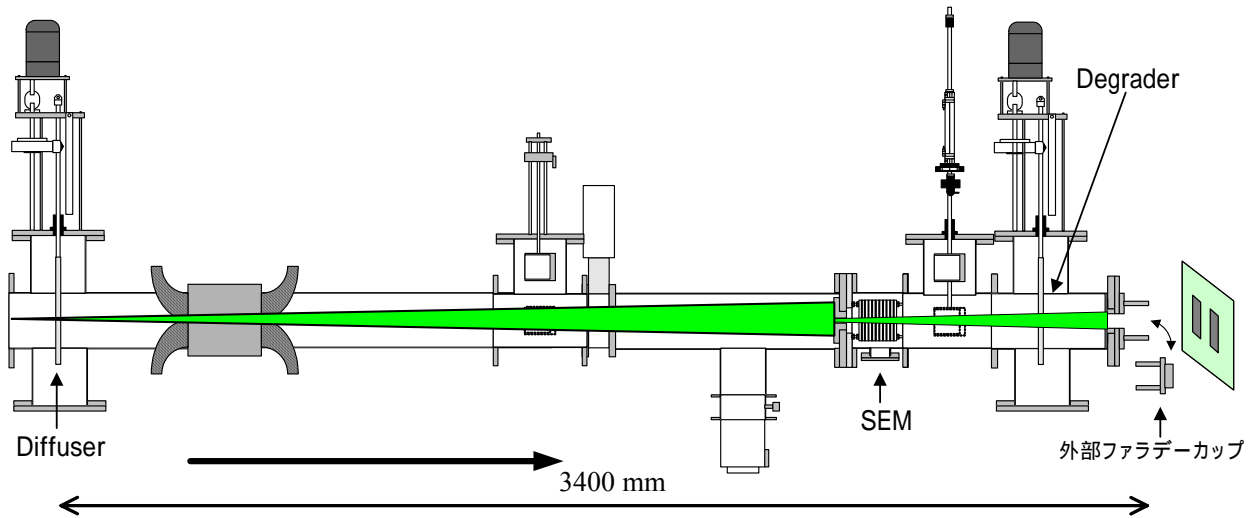


Fig.3 イオンによる半導体照射装置

4. 今後の展望

現在、中性子・イオン照射装置共、実際の半導体デバイス照射試験に利用している。今後、半導体デバイスの更なる微細化に伴って、照射試験の需要は増えていくと考えられる。限られた時間で、より多くの照射試験を効率よく行い、また、信頼性のあるデータを取得できるよう、以下のような改良を予定している。

1) ステージの高精度化(現在製作中)

従来の XYR ステージを, XYZR の 4 軸とし駆動機構にステッピングモータを採用することによって、高精度でサンプルを移動させることが可能で、再現性もよい。

加えて、米国の多くのイオン照射設備で用いられているサンプルホルダも導入し、汎用性を高めている。

2) 重イオンエネルギー

高耐放射線性のデバイスに対して、現在のイオンエネルギーでは、イベントを起こすだけの LET を与えることは難しい。そのため、加速エネルギーの高めるとともに、照射装置によるエネルギーロスの低減を図っていく。

3) 準単色中性子の Tail の補正

準単色中性子場では、エネルギースペクトルの低エネルギー領域(Tail)による影響の除去が必要となる。様々な手法が試されているが、CYRIC では、Tail 領域と同様のスペクトルが得られる位置で試験をすることによって Tail 領域からの影響を除去することを検討している。

5. 参考文献

- [1] M. Baba et al.: *Ncl. Instr. Meth. A Vol.376* (1997)439-443
- [2] T. Makino et al.: *Rad. Prot. Bulletin* (2005)213-216
- [3] <http://www.cyric.tohoku.ac.jp>
- [4] A. Terakawa et al.: *Ncl. Instr. Meth. A Vol.491* (2002)419-425
- [5] S. Kamada et al.: *Rad. Prot. Bulletin* (2005)291-293
- [6] Y. Yahagi et al.: *Proc. IEEE International Reliability Physics Symposium* (2004) pp.669
- [7] USEF/SERVIS Data Base <http://www.usef.or.jp/>