

# 多価イオン照射による半導体試料改質の試み

電気通信大学 情報理工学部

先進理工学科 中村(信)研 久保田海

## 1:背景及び目的

### 1-1 シリコンカーバイド(SiC)

SiC は Si に比べてバンドギャップ、飽和ドリフト速度、絶縁破壊電界、熱伝導度が大きいことから、次世代パワーデバイスの材料として注目されている。しかし、現在報告されている SiC-MOSFET は SiC の物性から期待される性能が達成されていない。その最大の要因は MOS 界面におけるチャネル移動度が小さいためチャネル部分での抵抗が大きくなっていることである。これは酸化膜/SiC の界面特性が悪いためである。図 1 に示す様に酸化膜/SiC 界面には結合を持たないダングリングボンドやカーボンクラスターなどの多くの界面準位が存在する。Afanas'ev らによればその主要因はカーボンクラスターだと考えられているため、残留カーボンの除去、残留カーボンに起因した欠陥の終端を行うことで界面準位を減少し MOS デバイス移動度の向上につながるとされている。[1]

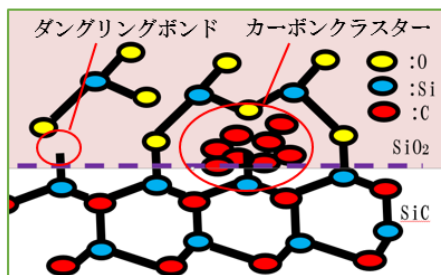


図 1 界面準位

### 1-2 酸化物半導体

Ni 酸化物半導体は光学的・電氣的・磁気特性、優れた化学安定性を持つ魅力的な材料である。また、NiO は酸素過剰の状態になると、Ni<sup>3+</sup>イオンが増加し、これによって抵抗率が低減されている。NiO 酸化物半導体のキャリア濃度や移動度の制御を行うことができればより高性能デバイス製作実現につながると考えられる。[2]

### 1-3 多価イオン

一般に多価イオンとは原子や分子から 2 個以上の電子を取り除いたイオンである。多価イオンの持つ大きな特徴のひとつとして、その膨大な内部エネルギーが挙げられる。図 2 に Bi イオンのイオン化エネルギーと内部エネルギーを価数の関数として示す。図 2 から分かるように Bi<sup>+</sup>の内部エネルギーは 6eV 程度であるが、Bi<sup>83+</sup>では約 600keV にも達する。[3]

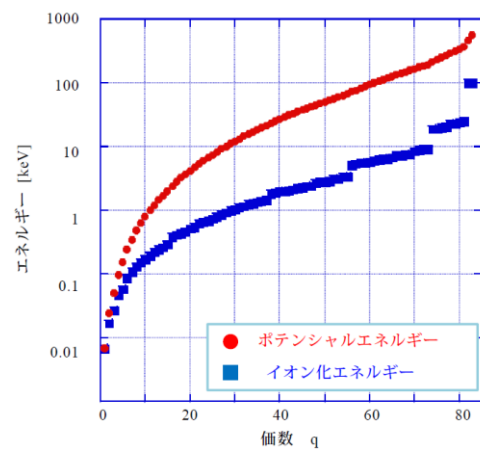


図 2 Bi イオンのイオン化エネルギーと内部エネルギー

このような大きなエネルギーを持つ多価イオンが物質と相互作用すると、中性原子や 1 価イオンとは異なる非常に興味深い現象を起こすことが知られている。

#### 1-4 本研究の目的

大きなポテンシャルエネルギーを持つ多価イオンが半導体との相互作用した際の結晶構造変化、電気特性変化を調べた報告は少なく非常に興味深い。本研究は SiC と NiO 半導体に着目し、多価イオンが SiC と NiO と相互作用したとき、その物性にどのような影響を与えるかを検討することを目的としている。そのために SiC 基板に多価イオンを照射した後に、MOS キャパシタを製作して界面準位密度を測定した。NiO は多価イオン照射後、電気伝導度を測定した。

## 2 装置

### 2-1 電子ビームイオントラップ(EBIT)

我々の研究室では、Tokyo-Electron Beam Ion Trap(Tokyo-EBIT) と小型 -Electron Beam Ion Trap(CoBIT)を用いて多価イオンを生成している。以下ではそれぞれ Tokyo-EBIT、CoBIT と記す。

図 3 に EBIT の多価イオン生成原理図を示す。EBIT は電子銃、ドリフトチューブ(DT)、電子コレクターの 3 つの部分で構成されている。電子銃から出射する電子ビームをトラップされたイオンに照射し、電子の逐次衝突によって電離(逐次電離)が進行し多価イオンを生成する。DT は 3 つの円筒電極から成り(図 3)、DT1,DT3 を高電位、DT2 を低電位にすることで井戸型ポテンシャルを作り、多価イオンを軸方向に閉じ込めることができる。また、DT の周囲には超伝導コイルが設置されており、軸方向に強力な閉じ込め磁場を作ること

ができる。電子ビームと多価イオンはこの閉じ込め磁場に巻き付く形で収束し、さらに電子ビームの空間電荷で径方向のポテンシャルが形成され、多価イオンは径方向にもトラップされる。

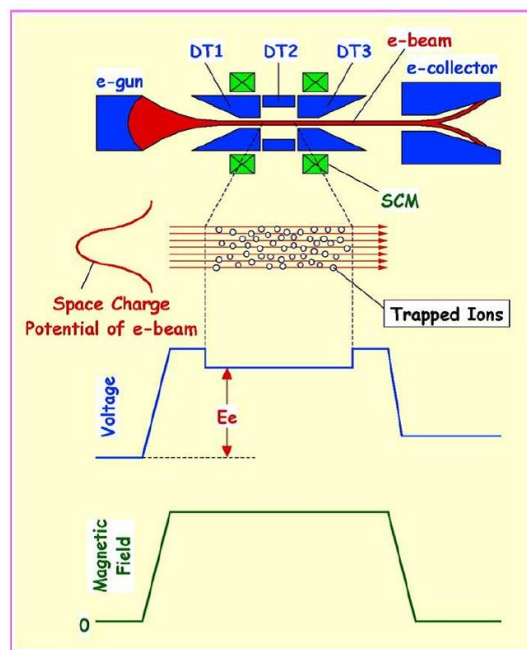


図 3 EBIT の多価イオン生成原理

### 2-2 多価イオン輸送ビームライン

図 4 に Tokyo-EBIT の電子コレクターから価数分析磁石までの装置概要を示す。

Tokyo-EBIT では引き出された多価イオンビームは電子コレクターの負の電圧により加速される。その後ディフレクター、静電レンズを通過後、価数選別され、実験チャンバーまで輸送されていく。図 5 に CoBIT のビームライン概要を示す。CoBIT でも、引き出された多価イオンビームは電子コレクターの負の電圧により加速される。その後、静電レンズを通過後、静電偏向器で 90 度に曲げられ、実験チャンバーまで輸送されていく。なお今回の実験では価数分析器を使用していないため、CoBIT 内で生成された全ての多価イオンを照射している。

CoBIT 内部には 2 段の静電レンズが設置してある。

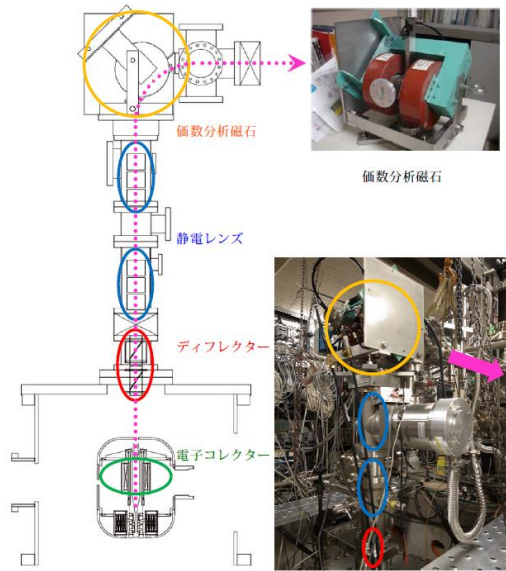


図 4 Tokyo-EBIT のビームラインと価数分析磁石

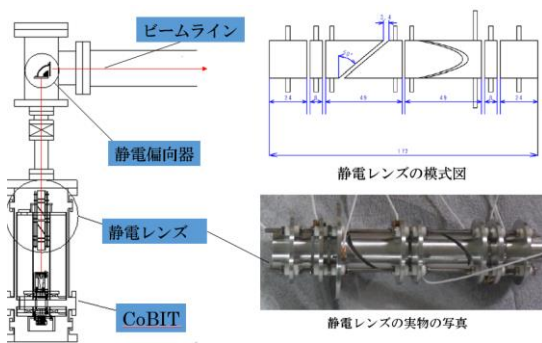


図 5 CoBIT のビームラインと静電レンズ

### 3 多価イオン照射実験

表 1 照射実験パラメータ

	CoBIT	Tokyo-EBIT
生成する多価イオン	Ar	Kr
ガス導入圧力	$\sim 10^{-7}$ Pa	$\sim 10^{-5}$ Pa
電子ビームエネルギー	$\sim 1$ keV	30keV
電子ビーム電流	10mA	170mA

中心磁場	0.08T	4T
多価イオンの引き出し	パルスモード	リークモード
イオン量測定	ファラデーカップ	MCP

#### 3-1 CoBIT 多価イオン照射実験

CoBIT では表 1 に示す実験パラメータで Ar 多価イオンを生成した。ファラデーカップを用いて電流を測定したところ 4.0pA であった。1 価の Ar イオンと仮定すると  $2.5 \times 10^7$  個、2 価の Ar イオンと仮定すると  $1.3 \times 10^7$  個のイオンが毎秒照射されることを意味している。照射した試料は MgO とサファイア基板上にエピタキシャル成長させた NiO である。試料は 10mm×10mm のサイズにカットしたものを使用した。その条件下で Ar 多価イオンを約 8 時間照射した。

#### 3-2 Tokyo-EBIT 多価イオン照射実験

Tokyo-EBIT では表 1 に示すような実験パラメータで Kr<sup>34+</sup> 多価イオンを生成し、3kV で加速させ CREE 社製の n 型 4-SiC 基板に約 50 時間をかけて、総計  $2.0 \times 10^{10}$  個照射した。多価イオンの照射領域が直径 4mm の円であるのでそこから照射密度を求めた所  $1.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$  であった。多価イオン照射後、熱酸化、POA、Al 電極形成を経て MOS キャパシタを製作した。

### 4 多価イオン照射後の試料の評価

#### 4-1 CoBIT を用いた照射実験の結果

表 2 と表 3 に結果を示す。表にある通り NiO/MgO 試料は抵抗が上がり、NiO/sapphire の方はほぼ変化が現れなかった。

表 2 NiO/MgO 照射実験結果

NiO/MgO	多価イオン 照射前	多価イオン 照射後
抵抗率[Ωcm]	70	171

表 3 NiO/sapphire 照射実験結果

NiO/sapphire	多価イオン 照射前	多価イオン 照射後
抵抗率[Ωcm]	$2.0 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-4}$

#### 4-2 Tokyo-EBIT を用いた照射実験の結果

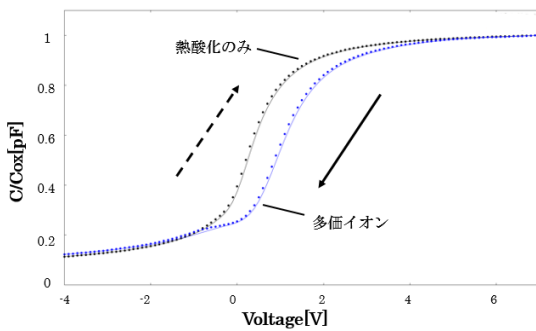


図 6 多価イオン照射を行った試料の C-V 特性(1MHz)

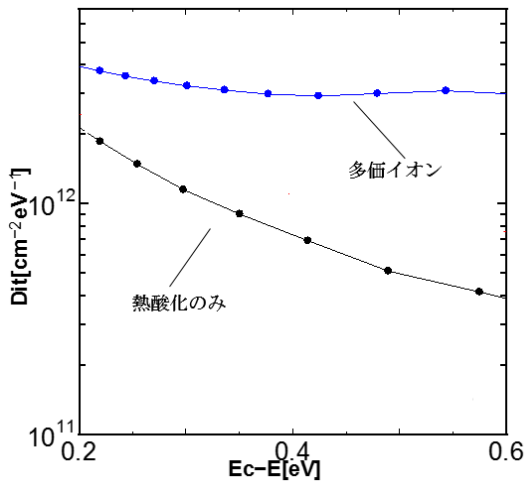


図 7 多価イオン照射を行った試料の  
界面準位密度

図 6 に示す黒色のグラフが熱酸化のみの C-V 特性であり、青色のグラフが多価イオン照射を行った C-V 特性である。また点線と実線はそれぞれ負から正に電圧を印加したもの、正から負に電圧を印加したものである。多価

イオン照射を行ったグラフでは正方向へのシフトが見られる。

界面準位密度測定の結果を図 7 に示す。ここでも熱酸化のみ、多価イオン照射を行ったグラフをそれぞれ黒色青色としている。多価イオン照射を行ったグラフでは広いエネルギー領域で界面準位密度が高いことが分かる。C-V 特性と界面準位密度の上昇から多価イオン照射によりダングリングボンドが増えたことが考えられる。

#### 5 まとめと今後の展望

CoBIT での照射実験では NiO/MgO 試料は抵抗が上がり、NiO/sapphire の方はほぼ変化が現れなかった。照射した総イオン数が少ないのと、価数も低いことから次回の実験では、Tokyo-EBIT でより高価数イオンの照射を試みたいと思う。Tokyo-EBIT での照射実験では、SiC 基板に  $Kr^{34+}$  を  $1.5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$  の密度で照射したところ、界面準位密度が上昇した。条件を変えて（照射時間、使用する多価イオン）照射実験を継続させ、その機構を解明していきたい。

なお、本研究は野崎研究室との共同研究として行われた。

#### 6 参考文献

- [1] 岩崎吉記:「シリコンカーバイドの絶縁ゲート型電界効果トランジスタに対するアンモニアプラズマ前処理と界面電子物性評価」奈良先端科学技術大学院大学 平成 22 年博士学位論文
- [2] 陳玉明:「UV 酸化法による NiOx ニッケル酸化膜の作製及び評価」電気通信大学 平成 23 年度卒業論文
- [3] 工藤孝弘:「走査型プローブ顕微鏡による多価イオン照射痕の観測」電気通信大学 平成 24 年度修士論文