

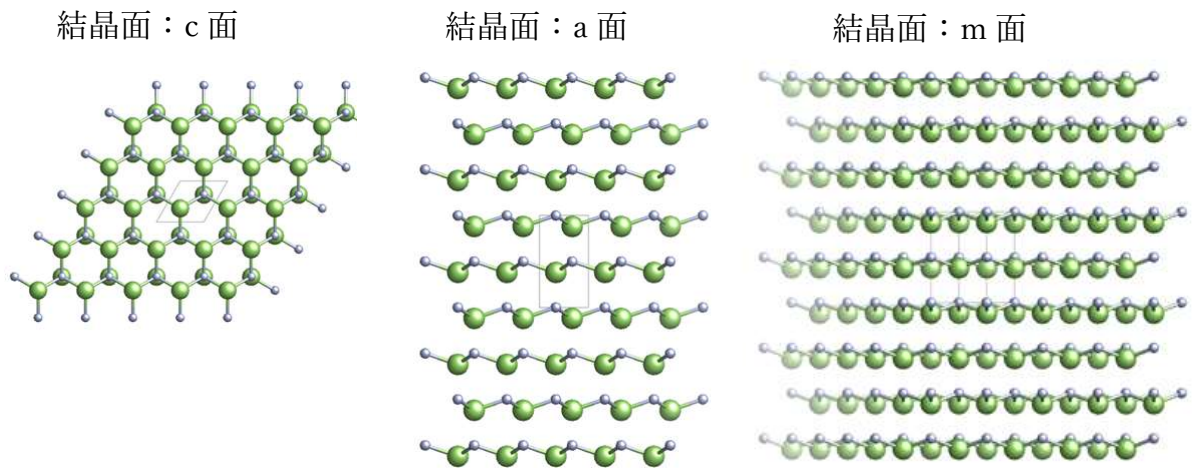
2_窒化ガリウムへのイオン注入

青木正彦

前回の記事では二体散乱近似のシミュレーションコード MARLOWE の解析機能に触れながらイオン注入現象を説明しました。今回は主にパワー半導体デバイスに使用されている化合物半導体へのイオン注入現象について説明します。化合物半導体の中でも 4H-SiC は実用化に至っています。最近ではチャンネルリングを利用したスーパージャンクションなどの新しいデバイス開発も行われています。4H-SiC へのチャンネルリング注入を行い、シミュレーションとの比較も行われています⁽¹⁾。この記事では縦型パワーデバイスの開発に不可欠な窒化ガリウムへの Mg イオン注入現象を MARLOWE コードによる解析結果を用いて説明します。

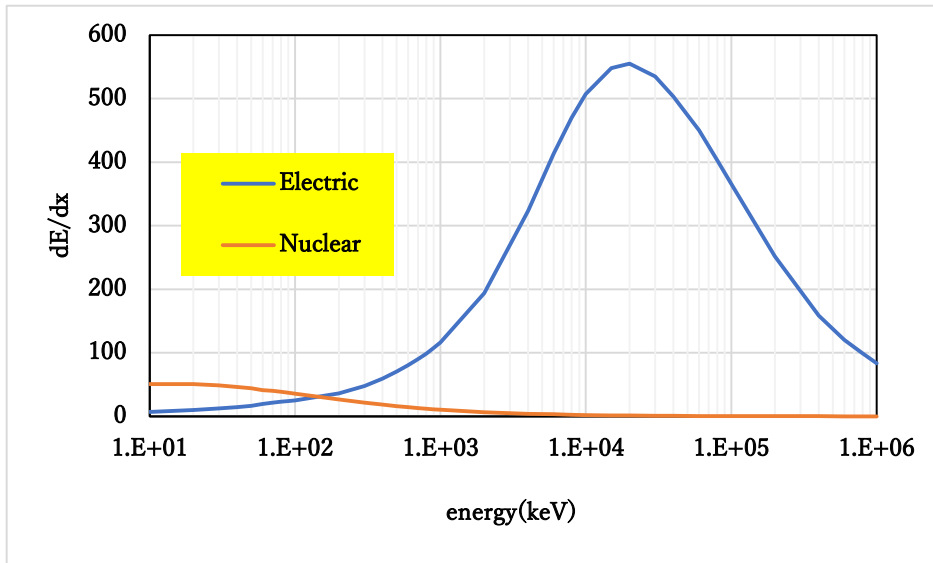
窒化ガリウムの結晶構造

結晶構造は Wurtzite 系であり空間群は $P6_3mC$ に分類されています。格子定数は a 軸 = 3.189 Å および c 軸 = 5.1855 Å です。下記に各結晶面から見た場合の結晶構造を示します。この結晶モデルは VESTA⁽²⁾ および ReciPro⁽³⁾ というソフトウェアによって作成されました。



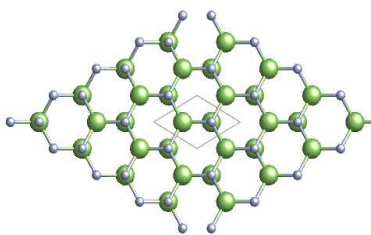
窒化ガリウムへのイオン注入

前回の記事で説明したようにイオン注入現象は核による阻止能と電子による阻止能によって説明できます。Mg を窒化ガリウムに注入した場合の阻止能をシミュレーションコード SRIM によって求めた結果を次のグラフに示します⁽⁴⁾。核阻止能と電子阻止能が一致するエネルギーは 150keV 付近となります。このエネルギー以下では核による阻止能が支配的で、このエネルギー以上では電子による阻止能が支配的になります。

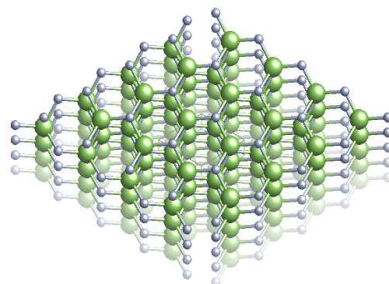


結晶構造から考えると c 軸に沿ってイオンを注入するとイオンが基板深くまですり抜けるチャンネルリング現象が生じやすいためこの現象を抑制する必要があります。その方法として表面に酸化膜をつけるか、ウェファを傾ける方法が採用されています。下記の図では結晶軸を傾けた場合に入射イオンからどのように見えるかを示しています。左の図は c 軸に沿ってイオン注入を行うチャンネルリング条件です。中央の図は c 軸を傾けた場合ですが明らかに縦方向にイオンがすり抜ける領域が存在するため面チャンネルリングが生じることが分かります。さらに面チャンネルリングを抑制するために結晶を面内回転した場合が右の図です。この図からランダム注入を実現できることがわかります。

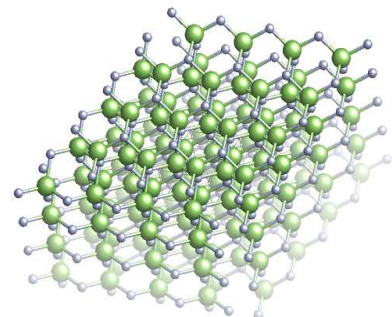
チャンネルリング



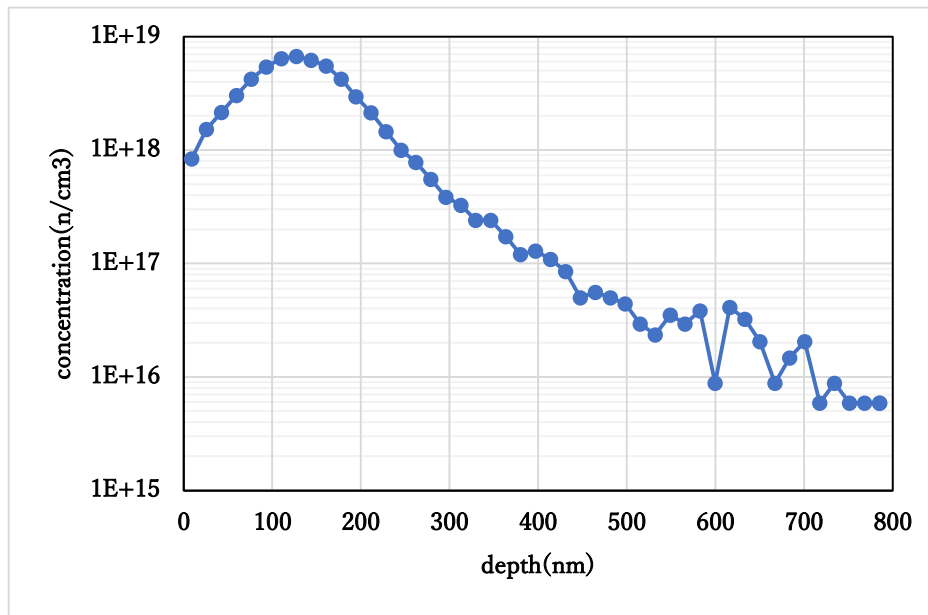
面チャンネルリング



ランダム



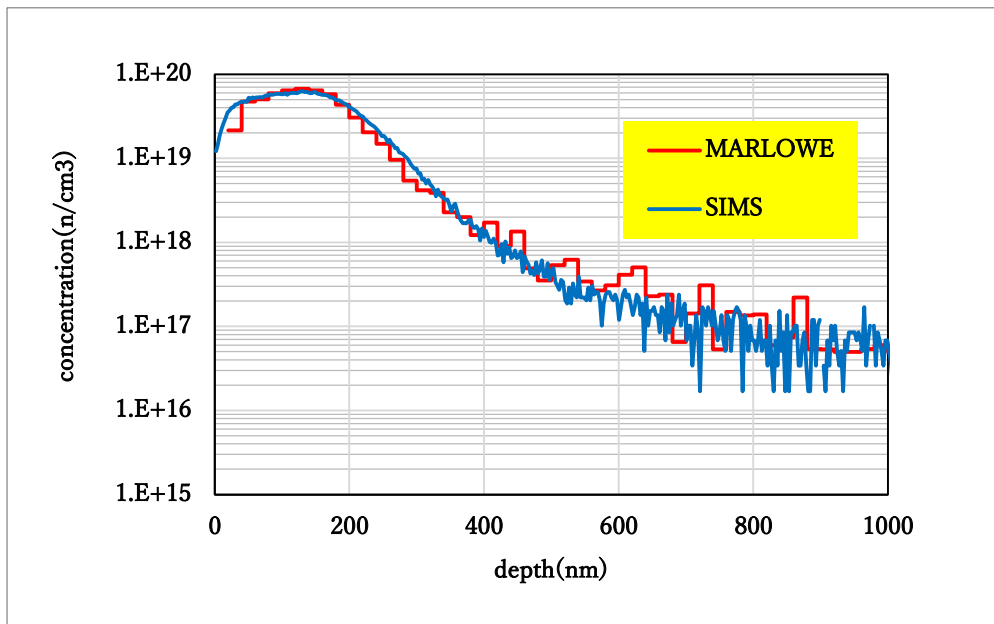
上述のランダム注入条件のもとで Mg を注入したプロファイルを次の図に示します。エネルギーは 150keV でドーズ量は $1E14/cm^2$ です。



さらに深さ方向に一定の濃度分布を実現するために注入エネルギーとドーズ量を変えた多段注入が利用されます。例えば深さ 200nm の一定濃度を実現するための注入条件は以下の通りです。

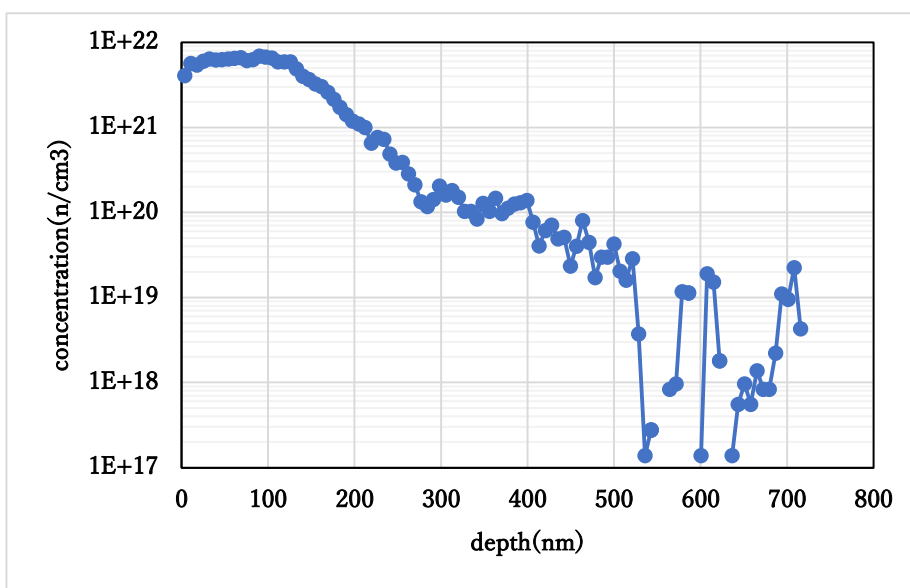
	エネルギー(keV)	ドーズ (n/cm ²)
1	30	8.0E13
2	50	7.0E13
3	80	2.0E14
4	150	8.5E14

この条件によるプロファイルを次の図に示します。SIMS 測定結果から分かるように深さ 200nm 程度まで注入濃度が一定であることがわかります。同じ注入条件での MARLOWE による解析結果も示します。SRIM というシミュレーションコードではターゲットがアモルファスと想定しているためチャンネルリング現象を扱うことはできません。しかし MARLOWE はターゲットの個々の原子との衝突を扱うことができるため注入分布のすそ野まで再現できていることがわかります。なお SIMS の結果と対応させるため MARLOWE の結果に SIMS のバックグラウンドレベルを足し合わせています。

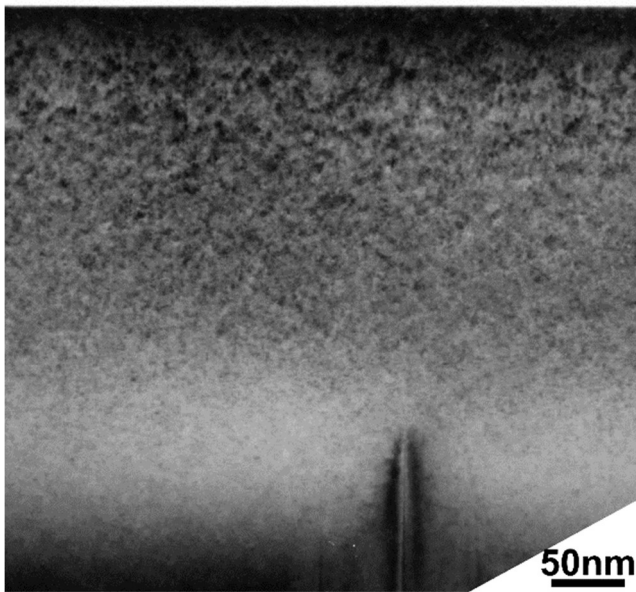


イオン注入によるダメージ

入射イオンはターゲット原子との衝突を繰り返しながらエネルギーを失い、最終的に停止します。この衝突においてターゲット原子をはじき出し空孔を生成するとともに、はじき出された原子が格子間原子となります。この対をフレンケル対と呼んでいます。これらがイオン注入による欠陥となります。同じ条件での空孔分布を下の図に示します。窒化ガリウムの原子密度は $8.8E21 \text{ n/cm}^3$ のため 7%ほどの結晶が崩れていると推定されます。

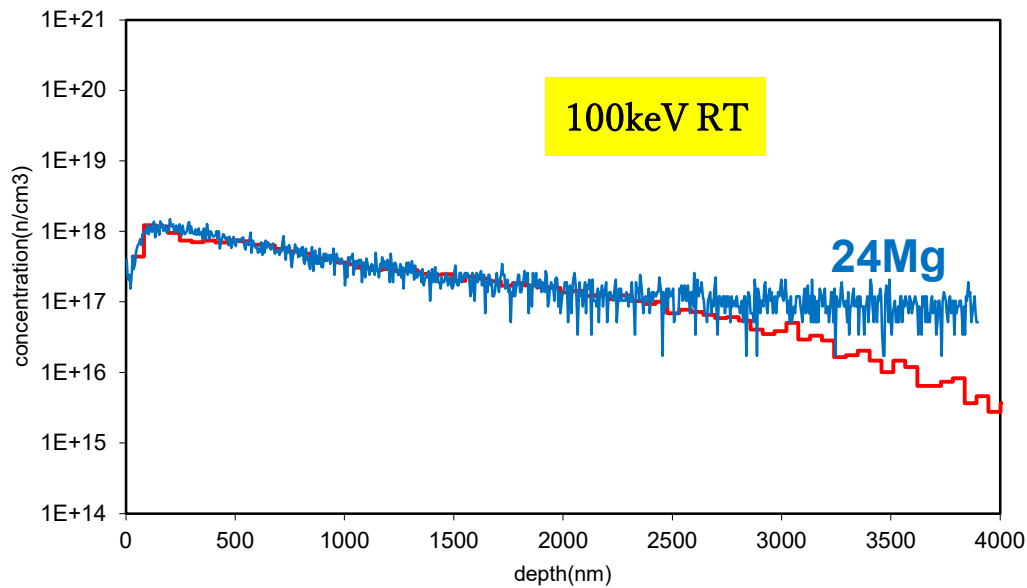


多段注入の場合の断面TEM像を示します⁽⁵⁾。Mg イオンの濃度が一定領域は表面から 200nm ですので表面から 50nm 付近の濃いアバタ状のコントラストはイオン注入によって生じた空孔あるいは空孔クラスターと考えられています。これらの欠陥を回復させるためにイオン注入後に高温アニールが施されます。アニールによって高い活性化率を実現することは困難であることが報告されています⁽⁶⁾。イオン注入起因の窒素空孔が集まって複空孔を形成し欠陥回復を阻害することが原因の一つと考えられています。そのため欠陥の少ないイオン注入が期待されます。



チャンネルリング注入

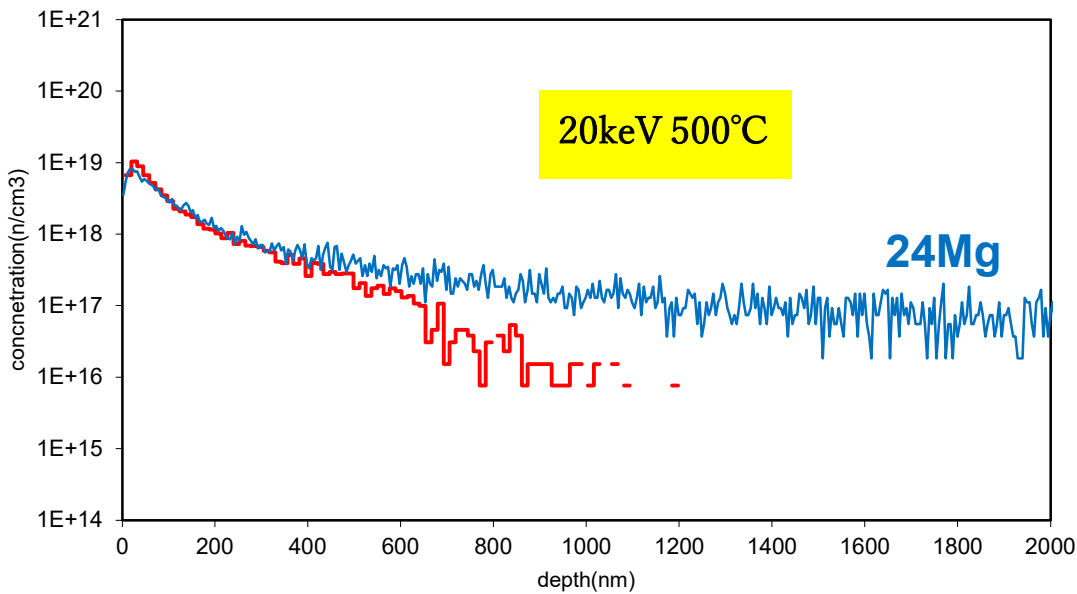
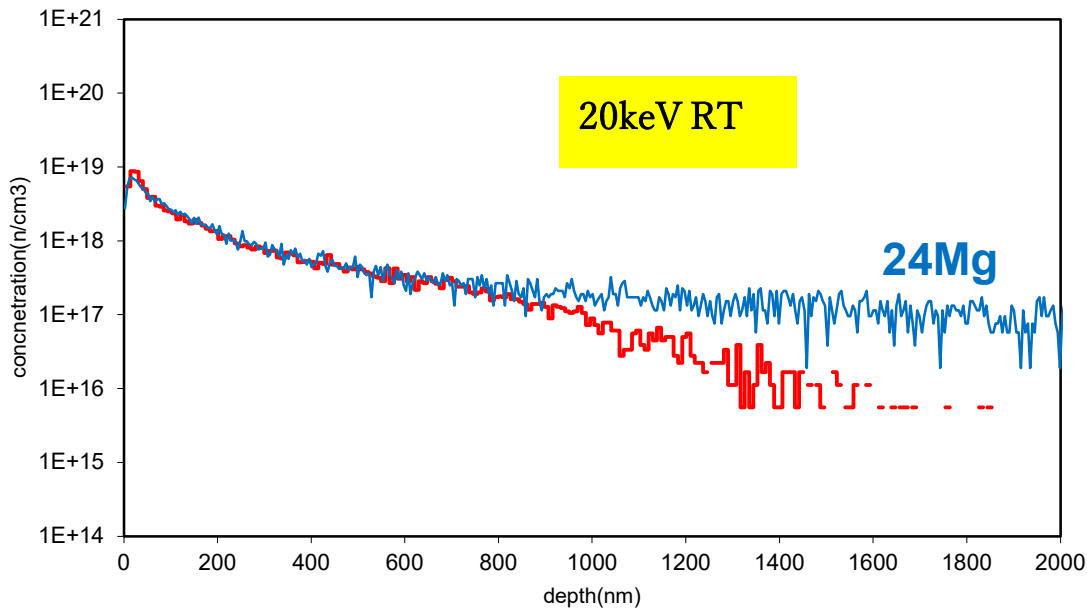
チャンネルリング注入の特徴はイオンを深くまで欠陥を抑制できることです。これは特定の結晶軸に沿ってイオンを注入する方法です。以前の応物にはサファイア基板の上にエピタキシャル成長させた窒化ガリウム膜にチャンネルリング注入を行いました。窒化ガリウムの膜厚が 2 ミクロンであったため注入分布のすそ野の確認が不十分でした⁽⁷⁾。そこで新たに窒化ガリウム基板に窒化ガリウムを成長させた基板を用いたチャンネルリング注入を実施しました。その結果を示します。水色は SIMS 結果、赤のステップチャートは MARLOWE による結果を表しています。



この結果から注入分布のすそ野まで SIMS 測定結果を再現できていることがわかります。調整されたパラメーターは以下の通りです。

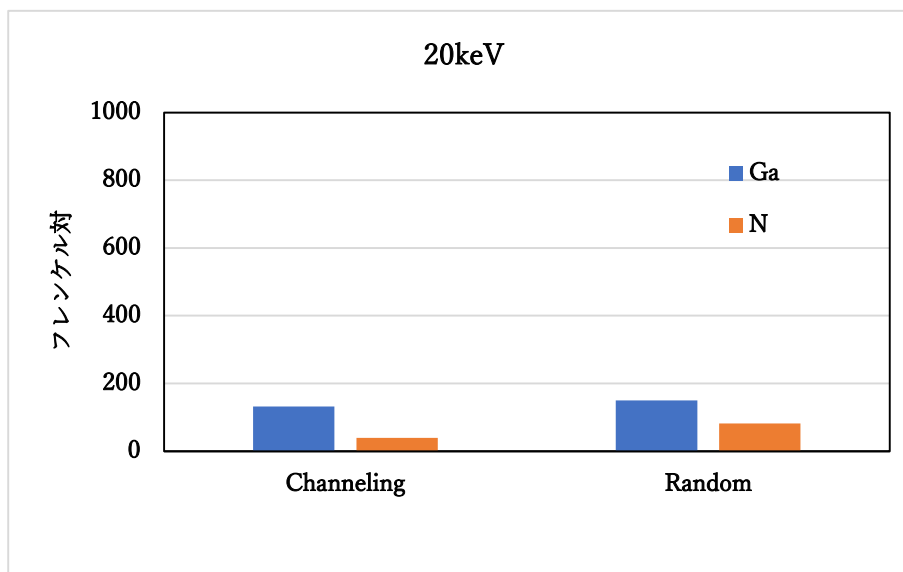
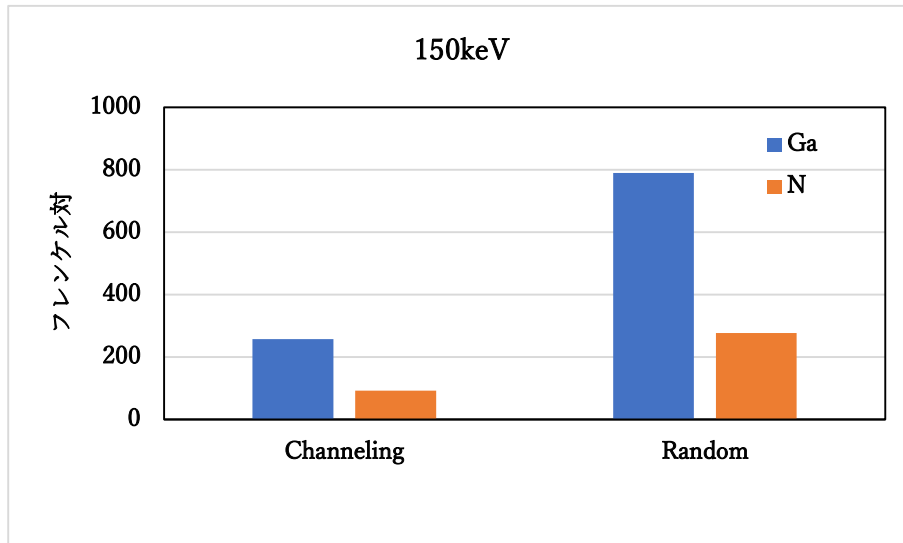
- 結合エネルギー
- 静止エネルギー
- デバイ温度
- エネルギー損失モデル
- 表面のアモルファス膜厚

MARLOWE の能力を評価するためにエネルギーは 20 keV であり、注入時の温度は室温と 500°C としました。その結果を下記に示します。この場合も SIMS の結果を精度良く再現できていることがわかります。500°C 注入の場合は注入プロファイルが室温の場合に比べて浅くなっていますが、これは格子振動の振幅が大きくなりチャンネリング現象が阻害された結果と考えられます。



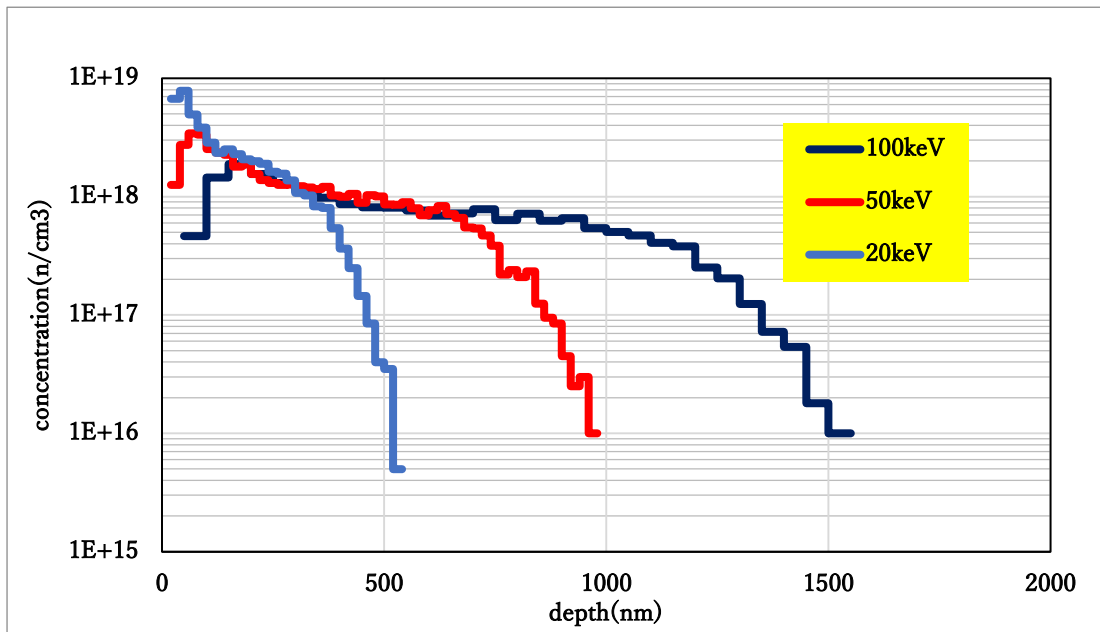
ランダム注入とチャンネルング注入の違いを欠陥形成の観点から説明します。下記の棒グラフは衝突によって生じた Ga のフレンケル対の数と N のフレンケル対の数です。イオンエネルギーが 20keV と 150keV の例を取り上げます。フレンケル対の数に関してはチャンネルング注入のほうが圧倒的に少ないことが分かります。さらにダメージエネルギーとフレンケル対の数からはじき出しエネルギーの平均値を見積もることができます。Ga の場合は 35 から 40eV という値が得られました。さらに N の場合は 120 から 125eV という値が得られました。これらの値は分子動力学による窒化ガリウムのはじき出しエネル

ギー平均値と比較できる値となっています。Nord らによると Ga の場合 45eV, N の場合 109eV という値が報告されています⁽⁸⁾。



他の結晶面からの注入

さらに結晶構造を書く結晶面から見た場合明らかに m 面から見た方が空隙の領域が狭くチャンネルリング現象が抑制されやすいと推定されます。実際に MARLOWE で m 面からのチャンネルリング注入を解析すると下記の図のように深さ分布が抑制され、濃度分布が一定の領域が広がっていることがわかりました。m 面ウェファは現在開発中とのことですが、新たなデバイス開発の可能性として参考になればと思います。



以上のように窒化ガリウムへのイオン注入現象を MARLOWE コードによる解析結果を用いて説明しました。ドーズ量が増加した場合のチャンネルリングプロファイルへの影響について解析を進めている状況です。次回はパワー半導体として今後の進展が期待される酸化ガリウムへのイオン注入について紹介します。

参考文献

- 1) M. K. Linnarsson, et. al., [Applied Physics A](#) volume 125, Article number: 849 (2019)
- 2) K. Momma and F. Izumi, “VESTA 3 for three-dimensional visualization of crystal, volumetric and morphology data,” J. Appl. Crystallogr., **44**, 1272–1276 (2011)
- 3) http://pmsl.planet.sci.kobe-u.ac.jp/~seto/?page_id=19&lang=ja
- 4) <http://www.srim.org/>
- 5) J. Maekawa et. al., Materials Science Forum ISSN: 1662-9752, Vol. 1004, pp 497-504
- 6) T. Niwa, T. Fujii, and T. Oka, Appl. Phys. Express **10**, 091002 (2017)
- 7) 青木正彦：応用物理，89 卷(2020)11 号
- 8) J. Nord, et. al., Physical Review B **68**, 184104(2003)

お問い合わせ先： 株式会社イオンテクノセンター

URL: <https://iontc.co.jp/contact/>