

イオン多重散乱による MBE- β -FeSi₂/Si ヘテロエピタキシーの評価Study of MBE- β -FeSi₂/Si Hetero-Epitaxy Using Ion Multiple Scattering九工大院情報工¹, 量研機構量子ビーム² 〇淵 雅也¹, 有馬 幹尋¹, 寺井 慶和¹,鳴海 一雅², 前田 佳均^{1,2*}Kyutech¹, QST-QuBS², 〇M. Fuchi¹, M. Arima¹, Y. Terai¹, K. Narumi², Y. Maeda^{1,2*}

*E-mail: maeda@cse.kyutech.ac.jp

【はじめに】シリコン基板上に RDE 法で初期層 (テンプレート) を成長させて、その上に MBE 成長させた高品位な β -FeSi₂ 薄膜のヘテロエピタキシーが可能になっている。2016 年春季講演[1]にて、軸イオンチャネリング測定から β -FeSi₂(110),(101)/Si を評価した結果、結晶性の評価項目である Si<111>軸方向の原子列での垂直方向の原子変位の割合 u/d_0 は Fe 原子で 33%, Si 原子で 28% となり、非常に大きな値となった。この結果は、従来の単一イオン散乱の仮定の枠組みでは理解が難しい。

そこで、本研究では、入射したイオンが β -FeSi₂ 薄膜中で小角散乱による偏向を受けるイオン多重散乱理論[2]を用いて、Si 基板側のイオンチャネリングから、逆に β -FeSi₂ 薄膜のエピタキシーを検討した。

【実験方法】RDE によって膜厚 ~ 20 nm のテンプレートを基板温度 670°C で作製し、その上に Fe-K セルと Si-電子銃を用いた分子線エピタキシャル (MBE) 法によって、n⁺-Si(111)基板上に β -FeSi₂(110), (101) エピタキシャル膜を 500 \sim 670°C で約 70 nm 成長させた。Si<111>軸チャネリング測定では、2 MeV-⁴He⁺ イオンの 165 度後方散乱から、 β [110], [101] と Si<111>原子列の後方散乱収量を測定した。

【結果】完全結晶の Si 基板上にエピタキシャル成長した β -FeSi₂(110), (101) 薄膜中では、入射した ⁴He⁺ イオンの各種の欠陥や不純物、原子変位による小角散乱が起こり、Si 基板にイオンビームが偏向して入射する。そのビーム偏向の影響を受けて完全結晶でありながら Si 基板の最小収量 χ_{min} は、本来の値よりもかなり大きな値を呈する。逆に言えば、偏向させた薄膜の評価にこの χ_{min} が利用できる。多重散乱理論[2]によれば、このとき多重散乱確率 $P(\tilde{\theta}_c, m) = \chi_{min}$ と書ける。ここで、 $\tilde{\theta}_c$ は換算臨界角 $\tilde{\theta}_c = Y\psi_{1/2}$, Y は元素固有の換算定数、 m は換算膜厚で、これは薄膜中での小角散乱の回数でもあり、薄膜の不完全性の評価に重要である。これらの関係式を利用して、Si 基板でのチャネリング測定から得た χ_{min} と半値幅角: $\psi_{1/2}$ から、Fig.1 に示した $P(\tilde{\theta}_c, m)$ vs m ダイアグラム[2]を利用して $m \sim 14$ を決定することでできた。この値は、イオンが β -FeSi₂ 薄膜中を Si<111>軸方向に飛翔するとき小角散乱が 14 回起こったことを示す。小角散乱の原因は何らかの原子列の乱れであるが、現在のところその詳細がわからないので、換算膜厚 m を原子列での原子変位 ΔX として $m = \pi(a_{TF}^2 + \Delta X^2)(Nt)$ で与える。ここで、 a_{TF} はトーマス・フェルミの遮蔽距離である。 N は β -FeSi₂ 格子中の原子密度、 t は膜厚である。上式を用いて、 β -FeSi₂ 薄膜のエピタキシーを ΔX によって評価できる。 $\Delta X \sim 0.4$ Å 程度が得られた。これは d_0 : 原子間隔にたいしての変位の割合 $\Delta X/d_0 = 13\%$ と大きな値になるが、イオン単一散乱の仮定で求めた Si の $\Delta X/d_0 = 28\%$ の半分程度になることが分かった。薄膜での単一イオン散乱の必要条件[2]: $m < 0.2$ であるが、測定した β 薄膜の $m \sim 14$ はその臨界条件よりもはるかに大きいので、今回行った多重散乱による解析はより正確な原子変位を与えていると考えられる。

以上のことから、90 nm 膜厚の Si(111)面上の β -FeSi₂(110), (101) エピタキシャル成長膜には、 $\Delta X \sim 0.4$ Å 程度の原子変位が存在する。 ΔX は、 β (110), (101) 面の成長可能な 6 つの等価ドメインの積層欠陥からなるモザイク構造[3]のステップ高さ 3.1 Å の 1/6 とほぼ一致していることから、小角散乱の原因はモザイク構造の β (110), (101) 面に不可避に成長した積層欠陥であると推察できる。

【参考文献】[1] 前田ら: 2016 年春応物講演会 20p-P13-7 [2] L. Feldman et al.: "Material Analysis by ion channeling", (Academic Press, New York, 1982), pp.110-114. [3] A. L. Vfizquez de Parga, et al.: Appl. Phys. A 57 (1993) 477-482.

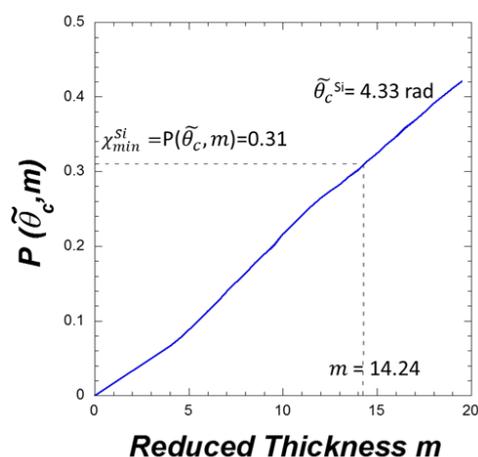


Fig.1 Plot of $P(\tilde{\theta}_c, m)$ vs reduced m at the constant $\tilde{\theta}_c = 4.33$ (rad) obtained in calculation for Si.