

アモルファス Fe-Nd-B 合金の 電子照射誘起結晶化によるナノ組織制御

永瀬 丈嗣*

1. 緒 言

超高圧電子顕微鏡は、(1)その高い加速電圧に起因する高い透過能力を活用した厚膜・三次元観察、(2)大きな試料スペースを活用した環境 TEM などの様々な特殊観察、(3)原子はじき出し効果を利用した照射効果の電子顕微鏡その場観察、などが可能であり、他の装置では達成しえない基礎研究を行うことができる。通常、(3)に注目した研究は、原子炉材料に関する放射線照射効果あるいは格子欠陥基礎研究に用いられることが多いが、本論文では、MeV 電子照射による非平衡材料のナノ組織制御と、これを利用することによる機能特性発現(磁気特性発現)について紹介する。

2. MeV 電子照射効果

金属材料に MeV 電子照射を行うと、入射高速電子と構成原子の弾性衝突によって一原子はじき出しがおこる。図 1 に、金属結晶および金属ガラスにおける MeV 電子照射模式図を示す⁽¹⁾⁽²⁾。一原子はじき出しにより、結晶中には空孔と格子間原子からなるフレンケルペアが、ガラス中には自由体積とそのアンチ成分からなる構造ゆらぎ(密度ゆらぎ)が形成される(a)。これらの原子レベルにおける照射損傷の導入は、単に材料中へ欠陥を導入するのみならず、その構造変化を誘起することも可能である。自由エネルギー-温度図(b)において、照射損傷導入の効果は、マクロには Bottom-up 型の効果をもたらし、照射欠陥の蓄積にとどまらずアモルファス相の形成といった非平衡相の形成をも達成する⁽³⁾⁽⁴⁾。一方、照射によって導入された空孔・自由体積による拡散促進、また移動の活性化エネルギーが極めて低い格子間原子導入による原子移動は、局所的(ミクロ)・短時間的な観点では、(c)に示すように、Top-down 効果によって、欠陥導入直後よりエネルギーが減少した構造を形成することも考えられる。このような効果により、アモルファスのナノ結晶

化⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾といった相転移の誘起も可能となる。ただし、この Top-down 効果の場合でも、マクロにみれば系全体の自由エネルギーは照射欠陥によって底上げされているため、局所的な構造変化によって形成される構造は、非平衡状態のものが形成されると考えられる。MeV 電子照射により、金属結晶のアモルファス化が可能であることを考えると、電子照射により形成される非平衡構造は、極めて非平衡度の高い構造が形成される可能性が高い。MeV 電子照射によるアモルファス相の結晶化は、Bottom-up 型と Top-down 型が複合した効果によるものと考えられる。

3. MeV 電子照射誘起ナノ結晶化を利用したナノ組織制御と機能特性制御

MeV 電子照射誘起ナノ結晶化⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾の発現は、現在までに 21 の金属ガラス合金で見出されている。この現象は、照射条件(加速電圧、照射強度、全照射量など)に大きく依存するため、同じ合金系でも、これらの条件が異なれば発現しない場合もある。

図 2 に、Fe 系金属ガラスの電子照射誘起ナノ結晶化挙動について、最も系統的かつ詳細に研究がなされた Fe₈₈Zr₉B₃ 金属ガラスの例を示す⁽⁷⁾⁽⁸⁾。メルトスパンアモルファス単相組織は、2.0 MeV 電子照射下でその構造を安定に保つことができずナノ結晶化する(a)(b)。高分解能電子顕微鏡観察(c)においても、ナノ結晶相の形成が確認できる。この電子照射誘起ナノ結晶化は、照射領域のみで発現するために、アモルファス中に直径約 1 μm 程度の領域のみをピンポイントで結晶化させることが可能である。さらに、電子顕微鏡内で照射場所を選択することにより、模式図(d)に示すように、アモルファスマトリックス中に規則的にナノ結晶化領域を配置することが可能である(e)。

Fe 系金属ガラスは、一般的に軟磁性合金(例えば Fe-Si-B 系)として使用される。一方、これをナノ結晶化させるとより高性能な軟磁性材料(例えば Fe-Si-B-Nb-Cu, Fe-Zr-B

* 大阪大学講師; 超高圧電子顕微鏡センター(兼任, 工学研究科マテリアル生産科学専攻)(〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘 7-1)
Control of Nano-crystalline Structure in Fe-Nd-B Metallic Glass by MeV Electron Irradiation Induced Crystallization; Takeshi Nagase (Research Center for Ultra-High Voltage Electron Microscopy and Division of Materials and Manufacturing Science, Graduate School of Engineering, Osaka University, Ibaraki)
Keywords: metallic glass, electron irradiation, high voltage electron microscope (HVEM), crystallization, microstructure, nano crystal
2010年2月26日受理

