

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01764

研究課題名(和文) 励起プロセスを利用した新しい界面固相反応の開拓

研究課題名(英文) Development of novel interfacial solid-phase reaction using excitation process

研究代表者

佐藤 和久 (Sato, Kazuhisa)

大阪大学・超高压電子顕微鏡センター・准教授

研究者番号：70314424

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：低エネルギー電子照射を利用して、室温及び90 KにてFe/アモルファスSiO<sub>x</sub>界面に三方晶Fe<sub>2</sub>Siを形成した。75 keV電子照射によりアモルファスSiO<sub>x</sub>が解離し、生成したSiがFeとの固相反応によりFe<sub>2</sub>Siを形成したと考えられる。電子エネルギー75 keVはFeとSiの弾き出し損傷閾値以下であることから、a-SiO<sub>x</sub>の解離は電子励起効果に起因する。また、原子移動には熱エネルギーの寄与が含まれる。a-SiO<sub>2</sub>と比較して、a-SiO<sub>x</sub>の方が電子励起によりSi-O結合が容易に解離する傾向を示す結果が得られた。本手法では、電子照射領域に選択的にFe<sub>2</sub>Siを室温以下で形成することが可能である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

固相反応の平衡は、温度や構成成分の活量など状態変数により決定され、反応が進行する方向は自由エネルギー変化の符号により決定される。そのため、最適な触媒の活用や高温・高圧環境の利用など、種々の材料創製プロセスが確立されてきた。しかしながら、励起プロセスを利用することにより、熱処理では進行しない固相反応が室温で進行する場合がある。すなわち、電子励起を用いて実現可能な無機固相反応の対象を拡大することが可能である。本プロセスでは、反応領域(=電子照射領域)をナノからサブミリメートルまでマルチスケールに選択し、空間的に自在に化合物を選択的に形成できる点もユニークな特徴であり、広範な波及効果が期待される。

研究成果の概要(英文)：Trigonal Fe<sub>2</sub>Si phase was formed at the Fe/amorphous SiO<sub>x</sub> interface using low-energy electron irradiation. Pure Si atoms dissociated from the a-SiO<sub>x</sub> by 75 keV electron irradiation reacted with Fe. The silicide formation was confirmed at room temperature and at 90 K. Such a low temperature synthesis of Fe<sub>2</sub>Si can be attributed to the dissociation of SiO<sub>x</sub> induced by electronic excitation, since the 75 keV electron irradiation is below the threshold of knock-on atom displacement both for Fe and Si. Atomic migration induced by electronic excitation involves contribution of thermal energy; the amount of Fe<sub>2</sub>Si formed at room temperature was greater than that at 90 K. It is inferred that the Si-O bond is more easily dissociated by electronic excitation in a-SiO<sub>x</sub> rather than a-SiO<sub>2</sub>. The formation of Fe<sub>2</sub>Si is consistent with the prediction based on the EHF model for the Fe-Si system. It is possible to selectively form Fe<sub>2</sub>Si in the electron-irradiated area at room temperature.

研究分野：材料科学、電子顕微鏡学

キーワード：励起プロセス 内殻電子励起 オージェ崩壊 界面固相反応 金属シリサイド 微細パターンニング 電子顕微鏡

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

電子励起は、価電子励起と内殻電子励起とに区分されるが、価電子励起に関しては主にレーザー光照射を用いて、化合物結晶のアモルファス化[1]、半導体表面からの構成原子の脱離[2、3]、準安定な表面ナノ構造の生成[4、5]、酸化物薄膜の相転移[6]などが国内外で報告されている。

一方、内殻電子励起は分子の化学結合切断に関する研究例が多く、無機固相反応に関する研究は極めて少ない。特に通常の熱処理では進行しない固相反応の例としては、低エネルギー電子照射による(1)GaSb化合物半導体ナノ粒子のGaとSbへの分解[7]、(2)Pt/アモルファス(a-)SiO<sub>x</sub>界面での $\alpha$ -Pt<sub>2</sub>Si生成[8]が報告されているのみである。これら2例とも応募者の所属する研究グループによる先行研究であり、いずれも内殻電子励起による原子移動が固相反応に大きく関わっているものと考えられている。

研究代表者は、ナノスケール無機固体材料における機能発現メカニズムの解明を主眼として、透過電子顕微鏡法、電子・X線分光法による原子ダイナミクス・相安定性と新しい構造物性評価法の確立に関する研究に従事してきた。無機固体材料において、熱処理が固相反応制御の根幹となる。しかしながら、電子励起に起因する原子移動では、熱処理では生じない固相反応(ギブス自由エネルギー変化 $\Delta G$ が正の固相反応)が進行する場合があることが近年明らかになってきた。例えば、構成原子の弾き出しを伴わない低エネルギー電子照射(25-75keV)により、Pt/SiO<sub>x</sub>界面でPt<sub>2</sub>Siが生成する[8]。研究代表者らの研究により、このPt<sub>2</sub>Si形成にはSi2p準位の電子を励起する必要があること、内殻電子励起による解離生成物であるSi原子がPt<sub>2</sub>Si形成に寄与することが明らかになった[9]。これは、Si2p準位に形成された内殻正孔のオージェ崩壊により価電子帯に2正孔が生成し、Si-O結合が切断されることに起因する。このように、励起プロセスの利用により、実現可能な無機固相反応の対象を拡大し、新材料創製に寄与する可能性が明らかになってきた。しかしながら、材料科学分野で内殻電子励起による化学結合切断を利用した固相反応や微細組織制御は未開拓であり、電子励起により固相反応を制御できるかどうかは興味深い課題である。このような背景のもと、内殻電子励起による固体中での化学結合切断に起因した個々の原子移動(素過程)とマクロな固相反応との対応を明らかにして、新しい無機固相反応プロセスを開拓することを目指す本研究計画を立案するに至った。

### 2. 研究の目的

FeとSiは地殻中での存在度が高く、その化合物は毒性が低く環境に優しい材料として注目されている。Fe-Si化合物は、強磁性であるFe<sub>2</sub>Si [10、11]ならびにFe<sub>3</sub>Si、熱電変換や赤外発光素子などの用途を有する $\beta$ -FeSi<sub>2</sub> [12、13]など、多様性に富む機能性材料であり、その製造プロセスやデバイス応用について多くの研究が進められている。FeとSiは地殻中での存在度が高く、その化合物は毒性が低く環境に優しい材料として注目されている。しかしながら、Feシリサイドは高温プロセスを用いて創製されており、より低環境負荷な作製方法の探索が望まれる。近年、内殻電子励起を利用することにより、熱処理では生じない固相反応が進行する場合があることが明らかになってきた。この手法では、選択した領域のみに室温以下で化合物を形成することが可能である。本研究では、内殻電子励起に起因した個々の化学結合切断・原子移動(素過程)とマクロな固相反応(Fe/アモルファスSiO<sub>x</sub>界面でのFeシリサイド生成)との相関に着目して、反応メカニズムを材料科学的な観点で明らかにし、励起プロセスを利用した新しい界面固相反応を開拓することを目的とする。

### 3. 研究の方法

真空蒸着法を用いて、NaCl(001)及びSi(111)単結晶基板上にSiOとFeを逐次蒸着し、a-SiO<sub>x</sub>/ $\alpha$ -Fe/a-SiO<sub>x</sub>積層薄膜を作製した(x $\sim$ 1.5)。同様に、RFマグネトロンスパッタ法を用いて、SiO<sub>2</sub>とFeをスパッタし、a-SiO<sub>2</sub>/ $\alpha$ -Fe/a-SiO<sub>2</sub>積層薄膜を作製した。NaCl(001)基板上に成膜した試料を蒸留水に浸漬して、NaCl基板を溶解除去し、試料薄膜をCuマイクログリッドにすくい取り、平面観察用試料とした。一方、Si(111)基板上に成膜した試料を用いて、集束イオンビーム(FIB)によるマイクロサンプリングにより断面観察用試料を作製した。電子照射及び微細組織観察には、透過電子顕微鏡(TEM; 日立H-7000 (75 kV)、日本電子JEM-ARM200F (200 kV))を用いた。電子照射はエネルギー75 keVにて室温及び90 Kで行った。高分解能観察ならびに走査透過電子顕微鏡観察は200 kV-TEMを用いて行った。組成分析にはエネルギー分散型X線分光法(EDS; JEOL JED-2300)を、状態分析には電子エネルギー損失分光法(EELS; Gatan ContinuumK3)を用いた。

### 4. 研究成果

#### (1) 平面観察結果

a-SiO<sub>x</sub>/ $\alpha$ -Fe/a-SiO<sub>x</sub> 薄膜(as-depo. 試料)の明視野(BF)TEM像と制限視野電子回折(SAED)図形を図1(a)に示す。Feは不連続薄膜を形成し、SAED図形には $\alpha$ -Feの110、200反射とa-SiO<sub>x</sub>の第1ハローが観察される。室温(298 K)で75 keV電子照射を行うと、薄膜組織が図1(b)に示すように顕著に変化し

た。ドーズレートは  $1.4 \times 10^{24} \text{ e/m}^2\text{s}$ 、トータルドーズは  $1.0 \times 10^{28} \text{ e/m}^2$  である (照射時間: 7.2 ks)。SAED 図形には  $\alpha\text{-Fe}$  以外の多数の Debye-Scherrer リングが現れており、解析の結果、三方晶の  $\text{Fe}_2\text{Si}$  ( $\text{Fe}_2\text{Si}$  型構造、 $P\bar{3}m1$ ) が生成していることが判明した。SAED 図形から見積もった格子定数は  $a = 0.403(1) \text{ nm}$ 、 $c = 0.512(1) \text{ nm}$  であり、文献値 ( $a = 0.40520 \text{ nm}$ 、 $c = 0.50855 \text{ nm}$ ) とほぼ一致した [14]。照射電子エネルギー 75 keV は Fe、Si の弾き出し閾値より低いことから [15]、電子照射による構造変化の起源として弾き出し損傷は除外される。すなわち、75 keV 電子照射による電子励起効果により  $\text{a-SiO}_x$  が解離し、生成した Si が Fe と化合物を形成したと考えられる。

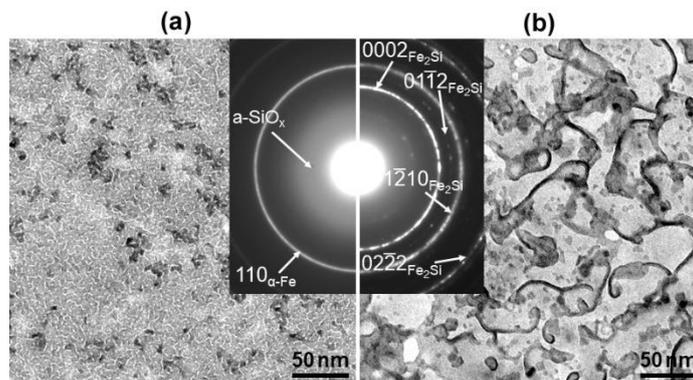


図 1.  $\text{a-SiO}_x/\alpha\text{-Fe}/\text{a-SiO}_x$  薄膜の BF-TEM 像と SAED 図形 (298 K)。(a) as-depo. 試料、(b) 75 keV 電子照射後 (トータルドーズ:  $1.0 \times 10^{28} \text{ e/m}^2$ )。

図 2(a)に 75 keV 電子照射後の SAED 図形の一部を拡大して示す。回折リングは三方晶  $\text{Fe}_2\text{Si}$

で指数付けされたが、図に示すように  $\alpha\text{-Fe}$  の 200 反射も観察された。強度は非常に弱く、未反応の Fe と考えられる。なお、Fe の 110 反射は  $\text{Fe}_2\text{Si}$  の  $1\bar{2}10$  反射と重なっており識別できない。結晶構造の模式図を図 2(a)右上に示す (青色が Si)。図 2(b)は SAED 図形から測定した回折強度プロファイルである。強度は円周方向に積分した。電子照射前後での回折強度プロファイルを比較すると、 $\text{Fe}_2\text{Si}$  の生成が明瞭にわかる。

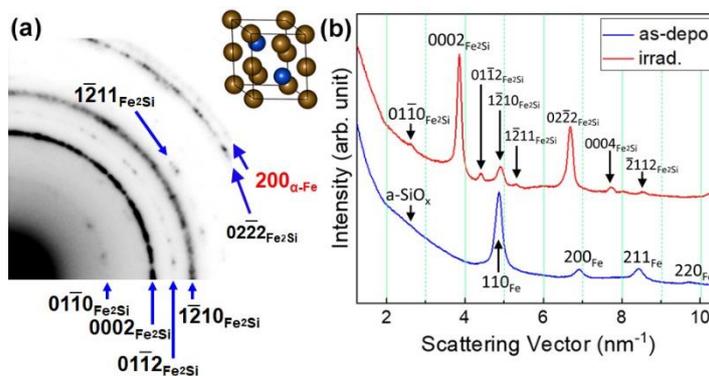


図 2. (a)75 keV 電子照射後に観察した SAED 図形、(b)電子回折強度プロファイル。

図 3(a)は  $\text{Fe}_2\text{Si}$  が観察された領域全体を示す BF-TEM 像である。観察した試料は図 1(b)に示した試料と同一である。○で囲んだ直径約  $1.2 \mu\text{m}$  の範囲内において顕著な粒成長が観察される。図 3(b)は粒成長した領域の一部を拡大した像である。As-depo. 試料における Fe 不連続薄膜 (図 1(a)) が電子照射により粒成長していることがわかる。図 3(c)は高分解能 TEM 像の例である。

$\text{Fe}_2\text{Si}$  の (0002) 格子縞 (面間隔  $0.25 \text{ nm}$ ) が観察される。格子縞は約  $10 \text{ nm}$  サイズの領域に拡がり、 $c$  軸の向きがランダムに配向していることがわかる。これは SAED 図形の Debye-Scherrer リングと対応している。高分解能観察により、 $\text{Fe}_2\text{Si}$  の局所的な分布が明らかになった。

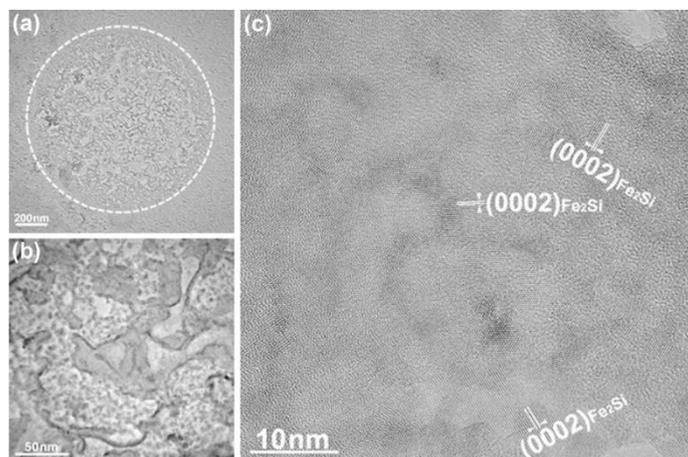


図 3. (a)電子照射領域中心部の全体像、(b)粒成長した領域の拡大像、(c)高分解能 TEM 像。

図 4 に電子照射後試料における STEM-EDS 元素マッピング結果を示す。観察した試料は図 1(b)に示した試料と同一である。図 4(a)は分析領域の HAADF-STEM 像、Fe (緑)、O (赤)、Si (青) 元素マップであり、粒成長した領域内でのこれら元素の分布の様子がわかる。図 4(b)は Fe、O、Si のマップを重ねて表示した画像である。黄緑色で表される Fe-rich 領域 ( $\text{Fe}_2\text{Si}$  ならびに未反応 Fe) が紫色で表される  $\text{SiO}_x$  を囲んでいる。このように、電子照射により粒成長した領域において構成元素が特徴的な分布を示すことが判明した。

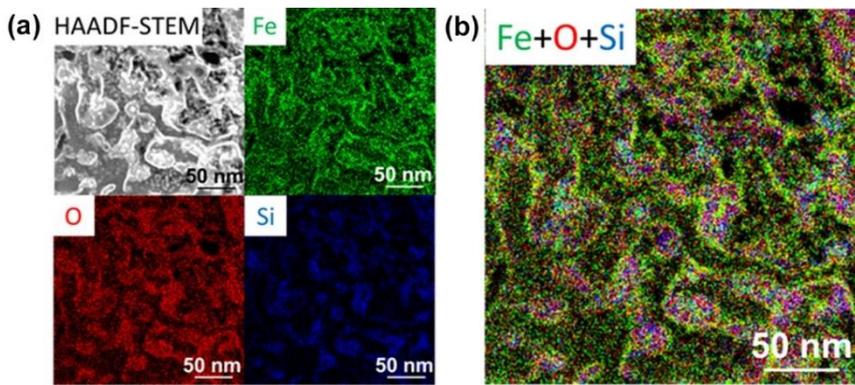


図 4. STEM-EDS 元素マッピング結果。(a) 分析領域の HAADF-STEM 像、Fe マップ、O マップ、Si マップ。(b) Fe、O、Si マップを重ねて表示した画像。

電子照射による  $\text{Fe}_2\text{Si}$  生成に及ぼす温度の影響について調べるため、液体窒素を用いて試料を冷却し、90 K にて 75 keV 電子照射実験を行った。図 5(a) は 90 K にて観察した  $\text{a-SiO}_x/\text{Fe}/\text{a-SiO}_x$  薄膜 (as-depo. 試料) の BF-TEM 像と SAED 図形である。室温で観察した図 1(a) と比較して変化は見られない。75 keV 電子照射後の観察結果を図 5(b) に示す。ドースレート ( $1.4 \times 10^{24} \text{ e/m}^2\text{s}$ )、トータルドース ( $1.0 \times 10^{28} \text{ e/m}^2$ ) は室温の場合と同じである。SAED 図形には三方晶の  $\text{Fe}_2\text{Si}$  の回折リングが観察され、90 K においても電子照射により  $\text{Fe}_2\text{Si}$  が生成することが判明した。しかしながら、 $01\bar{1}0$ 、 $01\bar{1}2$ 、 $1\bar{2}11$  など室温においても強度が弱い反射が 90 K では観察されない。これは室温の場合と比べて、90 K では  $\text{Fe}_2\text{Si}$  生成が限定的であることを示している。BF-TEM 像には粒成長はほとんど見られない。これらの結果は、固相反応のための原子拡散が温度に依存することを示唆している。同様の傾向が  $\text{a-SiO}_x/\text{Pd-Si}/\text{a-SiO}_x$  薄膜における Pd-Si の結晶化に際して観察されたが [16]、Pt/ $\text{a-SiO}_x$  薄膜における  $\alpha\text{-Pt}_2\text{Si}$  形成では明確な温度依存性は観察されなかった (低温においても顕著な粒成長が進行した) [17]。この点についてはさらなる研究が必要である。以上の結果、 $\text{a-SiO}_x/\text{Fe}/\text{a-SiO}_x$  薄膜への 75 keV 電子照射により、室温ならびに 90 K において  $\text{Fe}_2\text{Si}$  が生成することが明らかとなった。

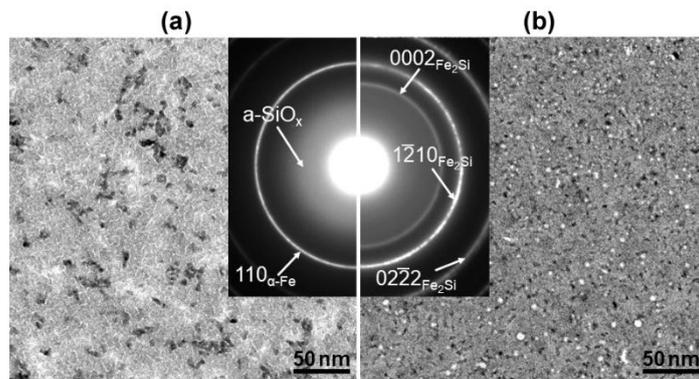


図 5.  $\text{a-SiO}_x/\alpha\text{-Fe}/\text{a-SiO}_x$  薄膜の BF-TEM 像と SAED 図形 (90 K)。(a) 蒸着まま (as-deposited)、(b) 75 keV 電子照射後 (トータルドース:  $1.0 \times 10^{28} \text{ e/m}^2$ )。

## (2) 断面観察結果

図 6(a) は室温で 75 keV 電子照射した断面観察試料の STEM-EDS 元素マッピング結果である (トータルドースは  $1.0 \times 10^{28} \text{ e/m}^2$ )。As-depo. 試料と比較して、黄緑色の Fe-Si 層は膜面垂直方向にはほとんど拡がっておらず、Fe シリサイド形成が主に薄膜面内で進行していることが判明した。図 6(b) は元素マップから抽出した濃度プロファイルである。図の縦軸は Si 基板表面と  $\text{a-SiO}_x$  層の境界を原点として表示している。横軸の濃度は図 6(a) に示す画像の横幅全体にわたって積算している。濃度の定量評価は薄膜近似に基づき k 因子理論値を用いて行った。そのため、軽元素、特に酸素の濃度は参考値である ( $\text{SiO}_x$  中の酸素濃度が実際よりも低く表示されている)。図中に矢印で示すように、Fe-Si 層の上下で Si 濃度が増加していることがわかる。以前の Pt/ $\text{a-SiO}_x$  系における実験結果と比較して、本研究ではより顕著な Si 濃度の増加が認められたが、これは本研究で用いたドースレートが約 20 倍高く、 $\text{a-SiO}_x$  の解離が促進されたことによると考えられる。Fe/ $\text{a-SiO}_x$  界面での局所的な Si 濃度増加は、電子照射による電子励起により  $\text{a-SiO}_x$  が解離し Si が生成していることを示している。

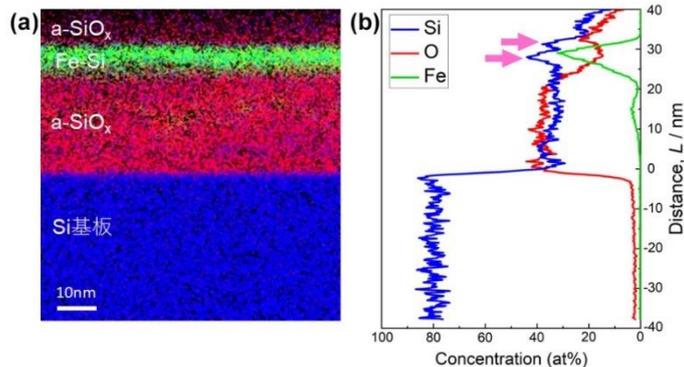


図 6 (a) 断面観察試料における STEM-EDS 元素マッピング結果 (75 keV 電子照射後)。(b) 元素マップから得られた濃度プロファイル。

### (3) 固相反応生成物に及ぼす長時間照射の影響

本研究では、電子照射により Fe/a-SiO<sub>x</sub> 界面で Fe<sub>2</sub>Si が生成することを明らかにした。一方、平滑な Fe/Si 界面での熱処理による生成物について、FeSi 相が最初に生成される相であると熱力学的モデルに基づいて予測されている[18、19]。本研究とは界面の平滑性が大きく異なるため、直接的な比較はできないが、a-SiO<sub>x</sub> の解離とともに生成物の組成が変化することが考えられる。そこで、電子照射時間を 28.8 ks まで延長して実験を行ったが(4.0×10<sup>28</sup> e/m<sup>2</sup>)、Fe<sub>2</sub>Si 以外の Fe シリサイドは生成しなかった。すなわち、電子励起により a-SiO<sub>x</sub> の解離が進行しても化合物中の Si 濃度は 33at%以上には増加しないことが判明した。Fe<sub>2</sub>Si 相の安定化の起源解明は今後の課題である。

### (4) 反応に及ぼす酸素濃度の影響

Fe/a-SiO<sub>x</sub> 界面での Fe<sub>2</sub>Si 生成に及ぼす酸素濃度の影響を調べるため、a-SiO<sub>2</sub>/α-Fe/a-SiO<sub>2</sub> 薄膜を作製し、4.1 節と同条件にて室温で電子照射実験を行った。得られた結果を図 7 に示す。75 keV 電子照射により Fe<sub>2</sub>Si が生成したが、01 $\bar{1}$ 0、01 $\bar{1}$ 2 などの反射が見られない(図 7(b))。この結果は、Fe/a-SiO<sub>x</sub> (x~1.5)と比較して Fe/a-SiO<sub>2</sub> 界面での固相反応はやや遅いことを示している。これは、a-SiO<sub>2</sub> は a-SiO<sub>x</sub> よりも化学的に安定であり、電子励起により Si-O 結合が解離されにくいと推察される。

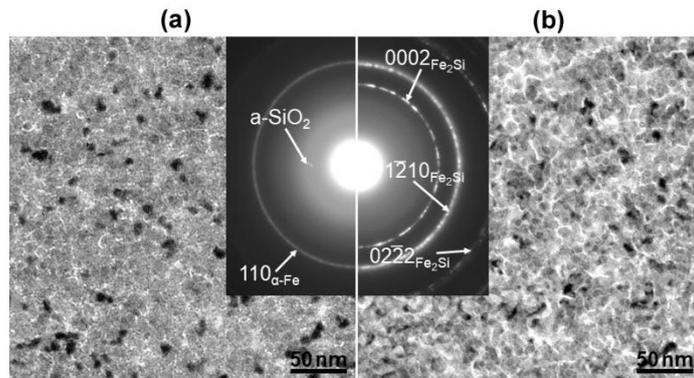


図 7. a-SiO<sub>2</sub>/α-Fe/a-SiO<sub>2</sub> 薄膜の BF-TEM 像と SAED 図形 (298 K)。(a) 蒸着まま(as-deposited)、(b) 75 keV 電子照射後(トータルドーズ: 1.0×10<sup>28</sup> e/m<sup>2</sup>)。

### (5) 電子励起による Fe<sub>2</sub>Si 形成機構

図 7(a)は本研究で得られた Fe/a-SiO<sub>x</sub> 界面での電子照射による Fe<sub>2</sub>Si を示す模式図である。75 keV 電子照射により、a-SiO<sub>x</sub> が解離し、生成した Si が Fe と反応して Fe<sub>2</sub>Si を形成する。次に、a-SiO<sub>x</sub> の解離について検討すると、図 7(b)のメカニズムが考えられる。すなわち、電子励起により Si に内殻正孔が生成し、続いて起こるオージェ崩壊により Si-O 結合が切断され、Fe-Si 結合が生成する。模式図では酸素の脱離が描かれているが、これは試料表面以外では起こらない。また、Si-O の再結合も生じると考えられる。電子励起後の緩和プロセスは約 10 fs 程度で生じ、その間に Si-O 再結合と Fe-Si 結合生成が競合した結果、最終的に Fe<sub>2</sub>Si 生成に至る。この過程で Si と Fe の原子移動が起こり、これが本研究で見出したように温度依存を示すと考えられる(図 1(b)と図 5(b))。固相反応を継続するためには、常に Si と Fe が原子レベルで界面を形成する必要がある、これが観察された顕著な粒成長により担われていると推察される。

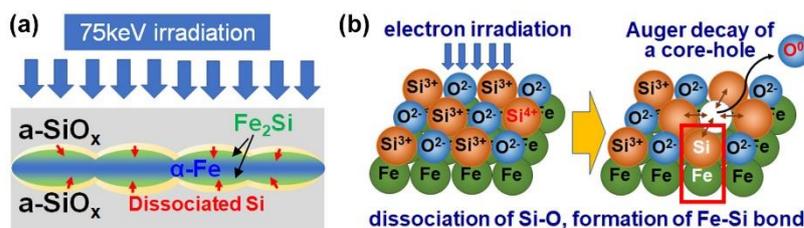


図 8. (a)Fe/a-SiO<sub>x</sub> 界面での電子照射による Fe<sub>2</sub>Si 生成を示す模式図。(b)電子励起による内殻正孔のオージェ崩壊による Si-O 結合切断と Fe-Si 結合生成を示す模式図。

<引用文献>

- [1] X. B. Li, X. Q. Liu, X. Liu et al., *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 178701.
- [2] J. Kanasaki, A. Okano, K. Ichikawa et al., *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 2495
- [3] K. Hattori, A. Okano, Y. Nakai, and N. Itoh, *Phys. Rev. B* **45** (1992) 8424
- [4] R. K. Raman, Y. Murooka, C. -Y. Ruan et al., *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 077401
- [5] J. Kanasaki, E. Enami, K. Tanimura et al, *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 087402
- [6] H. Ichikawa, S. Nozawa, T. Sato et al., *Nature Mater.* **10** (2011) 101.
- [7] H. Yasuda, A. Tanaka, K. Matsumoto et al., *Phys. Rev. Lett.* **100** (2008) 105506
- [8] J. -G. Lee, T. Nagase, H. Yasuda, and H. Mori, *J. Appl. Phys.* **117** (2015) 194307.
- [9] K. Sato, H. Yasuda, S. Ichikawa et al, *Acta Mater.* **154** (2018) 284.
- [10] C. P. Tang, K. V. Tam, S. J. Xiong et al., *AIP adv.* **6** (2016) 065317.
- [11] Y. Sun, Z. Zhuo, X. Wu, and J. Yang, *Nano Lett.* **17** (2017) 2771.
- [12] D. Leong, M. Harry, K. J. Reeson, and K. P. Homewood, *Nature*, **387** (1997) 686.
- [13] T. Suemasu, Y. Negishi, K. Takakura et al., *Appl. Phys. Lett.* **79** (2001) 1804.
- [14] P. Villars, *Pearson's Handbook Desk Edition* (ASM International, Materials Park, OH, 1997).
- [15] K. Urban, *Phys. Stat. Sol. (a)* **56** (1979) 157.
- [16] K. Sato and H. Mori, *Materialia* **32** (2023) 101888.
- [17] K. Sato and H. Mori, *ACS Omega* **6** (2021) 21837.
- [18] R. M. Walser and R. W. Bené, *Appl. Phys. Lett.* **28** (1976) 624.
- [19] R. Pretorius, T. K. Marais, and C. C. Theron, *Mat. Sci. Eng.* **10** (1993) 1.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Shuhei Hatanaka, Taro Tsuchiya, Shuhei Ichikawa, Jun Yamasaki, Kazuhisa Sato	4. 巻 123
2. 論文標題 Ultrafast dynamics of a photoinduced phase transition in single-crystal trititanium pentoxide	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 241902 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0175450	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kazuhisa Sato and Hirotarō Mori	4. 巻 32
2. 論文標題 Solute atom mediated crystallization of amorphous alloys	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materialia	6. 最初と最後の頁 101888 1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.mtla.2023.101888	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kazuhisa Sato	4. 巻 7
2. 論文標題 Structural Defects and Ferromagnetic Signature of V-Doped Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> Thin Films Grown on SrTiO <sub>3</sub> (001) Produced by RF-Magnetron Sputtering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 40480-40484
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsomega.2c05634	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kazuhisa Sato and Toshiya Matsushita	4. 巻 126
2. 論文標題 Stacking Faults and Intercalants in (Ta <sub>1-x</sub> Ti <sub>x</sub> )Se <sub>2</sub> Revealed by Cross-Sectional Transmission Electron Microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 14290-14296
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acs.jpcc.2c03943	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐藤和久	4. 巻 57(Suppl.2)
2. 論文標題 内殻電子励起による界面固相反応の制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 顕微鏡	6. 最初と最後の頁 58-59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kazuhisa Sato and Hirotarō Mori	4. 巻 6
2. 論文標題 Athermal Solid Phase Reaction in Pt/SiO <sub>x</sub> Thin Films Induced by Electron Irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 21837-21841
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.1c03604	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計19件(うち招待講演 2件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 佐藤和久, 森博太郎
2. 発表標題 溶質原子を介したアモルファスPd-Si合金薄膜の結晶化
3. 学会等名 日本金属学会2024年春季(第174回)講演大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 畑中 修平, 土屋 汰朗, 市川 修平, 山崎 順, 佐藤 和久
2. 発表標題 パルス電子顕微鏡を用いたTi305 の光励起相転移の時間分解観察
3. 学会等名 2024年第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 畑中 修平, 土屋 汰朗, 市川 修平, 山崎 順, 佐藤 和久
2. 発表標題 パルス電子顕微鏡によるTi305の光誘起相転移の時間分解観察
3. 学会等名 2023年度日本顕微鏡学会 超高分解能顕微鏡法分科会研究討論会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yuta Fujii and Kazuhisa Sato
2. 発表標題 Synthesis of iron silicide at $\alpha$ -Fe/amorphous SiO <sub>x</sub> interface by electron irradiation
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤和久
2. 発表標題 阪大UHVEMにおける電子照射効果に関する研究と最近の動向
3. 学会等名 全国超高压電顕研究・計測ネットワーク 第1回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤井悠太, 佐藤和久
2. 発表標題 電子励起による界面固相反応を利用したFeシリサイドの形成
3. 学会等名 日本金属学会2023年秋期(第173回)講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuhisa Sato and Toshiya Matsushita
2. 発表標題 Structural defects in (Ta <sub>1-x</sub> Ti <sub>x</sub> )Se <sub>2</sub> revealed by cross-sectional transmission electron microscopy and electron diffraction
3. 学会等名 International workshop on Advances and In-situ Microscopies of Functional Nanomaterials and Devices (IAMNano2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤井悠太, 佐藤和久
2. 発表標題 電子照射によるFeシリサイドの形成と微細構造解析
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第79回学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 太田和弥, 市川修平, 畑中修平, 佐藤和久
2. 発表標題 電子照射によるAu-Si準安定化合物の生成
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤和久, 松下隼也
2. 発表標題 (Ta <sub>1-x</sub> Ti <sub>x</sub> )Se <sub>2</sub> における積層欠陥と層間原子の断面STEM観察
3. 学会等名 日本金属学会2023年春季(第172回)講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 佐藤和久
2. 発表標題 内殻電子励起による界面固相反応の制御
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第65回シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Hatanaka, T. Tsuchiya, S. Ichikawa, J. Yamasaki, K. Sato
2. 発表標題 Time-resolved observation of photoinduced phase transition of pentoxide by ultrafast electron microscopy
3. 学会等名 14th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '22 (ALC'22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤和久
2. 発表標題 電子励起によるPt/SiO <sub>x</sub> 界面での固相反応
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 畑中修平, 土屋汰朗, 市川修平, 山崎順, 佐藤和久
2. 発表標題 パルス電子顕微鏡によるTi <sub>3</sub> O <sub>5</sub> の光誘起相転移の時間分解観察
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 畑中修平, 土屋汰朗, 市川修平, 佐藤和久, 山崎順
2. 発表標題 超高速電子顕微鏡を用いたTi305の光誘起相転移その場観察
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第78回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤和久, 松下隼也
2. 発表標題 TaSe2の長周期構造と構造欠陥に及ぼすTi添加効果
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第78回学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤 和久, 森 博太郎
2. 発表標題 電子照射によるPt/SiO <sub>x</sub> 界面での -Pt <sub>2</sub> Si形成
3. 学会等名 日本金属学会2022年春季(第170回)講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 太田 和弥, 市川 修平, 畑中 修平, 佐藤 和久
2. 発表標題 電子照射によるAu-Si準安定化合物の形成
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第64回シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 薄井 洸樹, Sun Haining, 市川 聡, 市川 修平, 畑中 修平, 佐藤 和久
2. 発表標題 AuTe <sub>2</sub> スパッタ薄膜の極微構造と相変態
3. 学会等名 日本顕微鏡学会第64回シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	太田 和弥  (Ota Kazuya)	大阪大学・大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻・大学院生(博士前期課程)  (14401)	
研究協力者	藤井 悠太  (Fujii Yuta)	大阪大学・大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻・大学院生(博士前期課程)  (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------