

令和 2 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K19020

研究課題名（和文）ゲルマニウム系二次元八ニカム結晶の自己組織化形成と結晶構造・電子状態制御

研究課題名（英文）Self-organized Formation of Ge-based Two-dimensional Crystals and Control of Crystalline Structure and Electronic State

研究代表者

大田 晃生（Ohta, Akio）

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：10553620

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：金属薄膜へのゲルマニウム(Ge)の固溶と偏析を制御することで、Ge原子の二次元結晶を形成することを目指して研究を推進した。Geと共晶反応を示すAlを二次元結晶成長のテンプレートとし、Al蒸着時の堆積速度や膜厚を制御することによりGe(111)ウェハ上にAlをヘテロエピタキシャル成長できることが分かった。さらに、Al蒸着時の基板温度やAl蒸着後の真空中熱処理における処理温度や時間が試料表面の平坦化とGe原子の表面偏析に与える影響を系統的に調べ、サブナノメートルの極薄Ge結晶層を成長できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ポストグラフェン材料として注目されているGe原子の二次元結晶の形成は、これまでに清浄化した単結晶金属表面上へのGe原子の蒸着により行われてきた。これに対して、本研究では、Geと共晶反応を示すAl薄膜をGeウェハ上にヘテロエピタキシャル成長し、基板加熱や熱処理に伴うGe原子のAl薄層中への固溶と表面偏析を制御することで、サブナノメートルのGe結晶を成長できることを明らかにすることができた。

研究成果の概要（英文）：We have studied the chemical and crystallographic structures of vacuum evaporated Al/Ge(111) before and after the thermal annealing to form the germanium (Ge) two dimensional (2D) crystals on the surface by the control of Ge segregation from Al. Hetero-epitaxial Al layer was found to be grown on Ge(111) substrate by controls of the Al thickness and deposition rate during the vacuum evaporation, which Al surface becomes the template of crystallographic structure of segregated Ge layer. The surface flattening and Ge segregation on Al/Ge(111) structure by the annealing have been systematically investigated, and the sub-nm-thick ultrathin segregated-Ge crystalline can be formed on the hetero-epitaxial Al surface.

研究分野：半導体工学

キーワード：ゲルマニウム 二次元結晶 表面偏析 電子状態 ポストグラフェン

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

シリセンやゲルマネンと呼ばれる Si 原子や Ge 原子の二次元結晶は、グラフェンと同様なハニカム構造を示し、高いキャリア移動度やトポロジカル絶縁性の発現が予測されており、超高速動作、超低消費電力な次世代電子デバイス材料として期待されている[1-3]。これまでに、超高真空中で Au(111)と Pt(111)の単結晶金属表面を清浄化した後、基板温度と堆積レートを精密に制御して Ge 原子を蒸着することでゲルマネンを形成できることが、2014年に初めて報告された。このような蒸着によるゲルマネンの形成がほとんどであるのに対して、これまでに我々は Si や Ge と共晶反応を示す金属である Ag との積層構造において、熱処理による Ag 表面への Ge 偏析を利用して、二次元結晶を形成することを見出してきた[4]。共晶系の特徴として、液相ではあらゆる濃度で溶け合うが、固相ではほとんど溶け合わないことが挙げられる。具体的には、化学溶液洗浄した Ge(111)上に、真空蒸着により Ag 薄層をヘテロエピタキシャル成長する。その後、石英管炉を用いて 450°C の窒素雰囲気中(大気圧)で熱処理することにより、試料表面の平坦化が進行し特徴的な三対称の形状が原子間力顕微鏡(AFM)像で観測されるとともに、ヘテロエピタキシャル成長した Ag 薄層中に固溶した Ge 原子が表面に偏析することで、二原子層の極薄 Ge 結晶を Ag 上に形成できることを明らかにした。さらに、ヘテロエピタキシャル Ag/Ge(111)構造を超高真空中で熱処理した場合においても、走査型トンネル顕微鏡(STM)観察により原子レベルで平坦なテラスが広域で形成されており、その表面で Ge 原子がハニカム状に配列したゲルマネンが形成することを明らかにしてきた[5]。

### 2. 研究の目的

本研究では、Ge 原子の金属薄層中への固溶と表面偏析を利用した Ge 二次元結晶の形成に対する知見を深めることを目的とし、Ag と同様な単位胞である面心立方格子を有し、格子定数(Ag: 0.409nm, Al: 0.405nm)も同等であることに加えて、エッチングやリソグラフィによる加工や酸化なども容易に生じる Al に注目した。また、Al は、Ag と同様に Ge と共晶反応を示す材料系であり、Ag よりも共晶温度(Ag-Ge: 651 °C, Al-Ge: 420 °C)が低いために、Ag よりも低温での二次元結晶が形成することが予想される[6]。本手法による二次元結晶の形成に重要となる二次元結晶の成長テンプレートとなる下地金属のヘテロエピタキシャル成長、試料表面の平坦化、熱処理や基板加熱による Ge 原子の表面偏析に力点を置き、研究を推進した。

### 3. 研究の方法

典型的な試料作成方法を記述する。p 型 Ge(111)ウェハ(比抵抗: 0.52 ~ 0.78 Ω·cm)を 4.5%に希釈した HF 溶液に浸漬することで、表面に形成した自然酸化膜と吸着した炭素を除去した。その後、W フィラメントと Al ワイヤを用いた抵抗加熱真空蒸着(到達真空度: ~ 1.5×10<sup>-4</sup> Pa)により、厚さ 40 nm から 160 nm の Al 薄層を堆積した。一部の試料は、Al 表面の自然酸化を防ぐために、大気暴露せずに真空中(到達真空度: ~ 1.5×10<sup>-4</sup> Pa)で熱処理を行った。試料作成後、触針段差計を用いて堆積した Al 薄層の厚さを調べ、結晶構造を X 線回折(XRD)および電子線後方散乱回折(EBSD)により評価した。また、原子間力顕微鏡(AFM)により熱処理による表面形状変化を調べ、単色化 AlK $\alpha$  特性 X 線(励起エネルギー(hv): 1486.6eV)を用いた X 線光電子分光(XPS)により熱処理前後の Al/Ge(111)構造の化学結合状態を分析した。さらに、熱処理によって析出した Ge 層の結晶性を調べるため、ラマン散乱分光および透過電子顕微鏡(TEM)観察を行った。

### 4. 研究成果

図 1 に、化学溶液洗浄した Ge(111)ウェハ上に真空蒸着した Al 薄層の AFM 表面形状像を示す。Al 薄層の厚さが 45 nm から 160 nm に増大するに伴い(図 1(a)~(c))、表面で観察される粒径のサイズも大きくなり凹凸が増大する。このとき、表面のラフネスを示す平均二乗粗さ(RMS)は 1.44nm から 1.79nm に増加する。また、Al 薄層を堆積する速度を 40~60nm/min から 140nm/min(図 1(d))もしくは 300nm/min(図 1(e))にすることで、より平坦な表面を形成することができた(図 1(d)および(e))。これは、堆積速度を速くすることで、真空蒸着時にチャンバー内に残留する気体との反応が少なくなり、Al の粒成長とそれらの合体を抑制できた

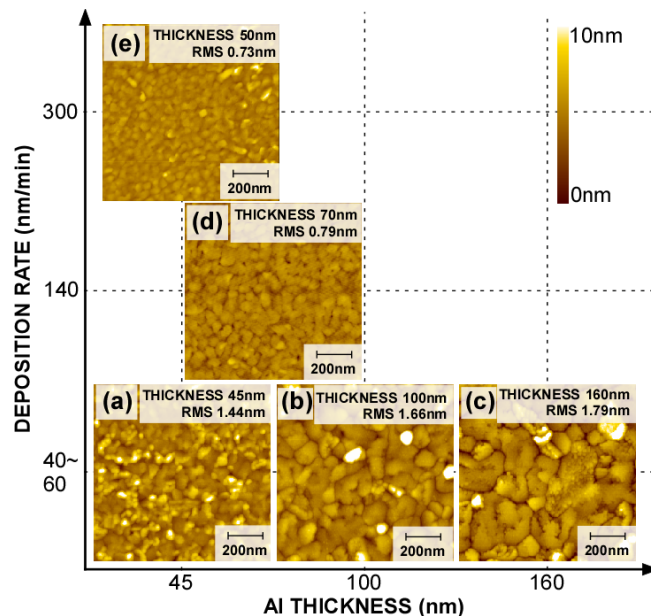


図 1 化学溶液洗浄した Ge(111)上に形成した、Al 膜厚 (a)45 nm、(b)100 nm、(c)160 nm、(d)70 nm の Al/Ge(111)構造の AFM 表面形状像。 Al 薄層の堆積レートは、(a~c) 40~60 nm/min、(d) 140 nm/min もしくは(e) 300 nm/min とした。

可能性が高い。したがって、表面ラフネスの小さい Al 薄層を形成するには、高い堆積速度で薄層にすることが重要であることがわかった。

次に、真空蒸着で形成した厚さの異なる Al 薄層の結晶性を、XRD および EBSD により評価した。図 2 に示す XRD により測定した厚さ 160 nm の Al/Ge(111)構造の  $\theta$ -2 $\theta$  スキャンでは、Ge(111)基板に由来する信号に加えて、Al(111)に対応する鋭いピークが明瞭に観測される。このとき、ピーク位置から見積もった Al の格子定数は 0.405 nm であり、文献値と良い一致を示す。しかしながら、XRD に比べて、より表面の結晶性を評価できる EBSD 分析において、厚さ 160 nm の薄層では様々な面方向を示す色彩が観測されており、最表面では多結晶であることが示唆される(図 3(a))。これに対し、厚さ 45 nm の Al 薄層では(111)配向を示す一様なコントラストであり、Ge(111)基板上で Al 薄層がヘテロエピタキシャル成長している可能性が高い(図 3(b))。これらの Al 薄層の厚さとその結晶性の関係は、図 1 に示す AFM 像やラフネスの変化と概ね一致する。したがって、真空蒸着した Al 薄層を、二次元結晶を形成するためのテンプレートとして用いるには、最表面の結晶状態が一様である厚さ 50 nm 程度の Al 薄層が最適であることが分かった。

そこで、厚さ 40 nm から 60 nm の Al 薄層を Ge(111)基板上に形成し、真空熱処理前後で測定した AFM 表面形状像を図 4 に示す。250 °C、350 °C、400 °C で熱処理した場合には、熱処理前に比べて表面形状に大きな変化は認められず、その RMS は 0.8 nm 程度と熱処理前と同等であった。一方、300 °C で熱処理した場合には、結晶構造を反映する特徴的な形状は確認されないものの、RMS は 0.5~0.6 nm まで低減し、表面平坦化の進行が認められた。この熱処理温度は Al と Ge の共晶点(Al-Ge : 420 °C)よりも 100 °C 程度低い。

これらの厚さ~50 nm の Al/Ge(111)構造において、Ge 原子の表面析出など真空熱処理が化学構造に与える影響を明らかにするために、XPS 分析を行った。図 5 に、Ge 3d および Al 2p 内殻光電子スペクトルの熱処理温度依存性を示す。熱処理は Al と Ge の共晶点よりも低い 200 °C、300 °C、もしくは 400 °C で 1 時間行った。まず、図 5(a)に示す Ge(111)上に Al 薄層をエピタキシャル成長した直後の Ge 3d スペクトルにおいて、Ge-Ge 結合に相当する信号が観測される。XPS の分析深度がおおよそ 10 nm であることを考慮すると、このことは Al 薄層堆積中に Ge(111)基板より Ge 原子が Al 表面にわずかに析出したことを示唆する。さらに、熱処理温度の増大に伴い Ge-Ge 結合成分が増大することから、試料表面近傍に Ge が拡散・析出していることがわかる。また、Ge の酸化成分は、300 °C までの熱処理では認められないのに対して、400 °C の場合には観測されており、表面近傍での顕著な組成ミキシングが示唆される。一方、図 5 (b)に示す Al 2p スペクトルでは、熱処理前後で Al 薄層に相当する Al-Al 結合成分に顕著な変化は認め

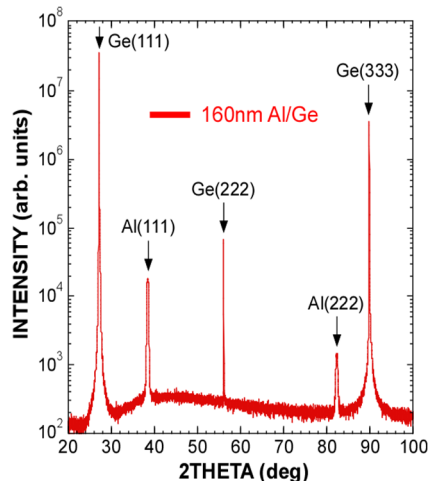


図 2 化学溶液洗浄した Ge(111)上に真空蒸着により堆積した厚さ 160 nm の Al 薄層の XRD  $\theta$ -2 $\theta$  スキャン。

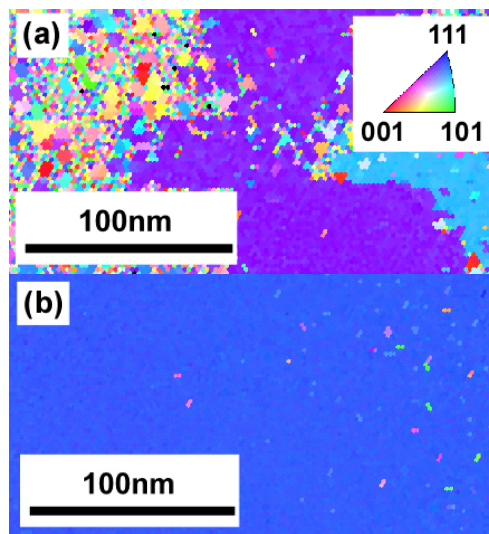


図 3 EBSD による Ge(111)上に真空蒸着により形成した(a)厚さ 160 nm および(b) 45 nm の Al 薄層の結晶性評価

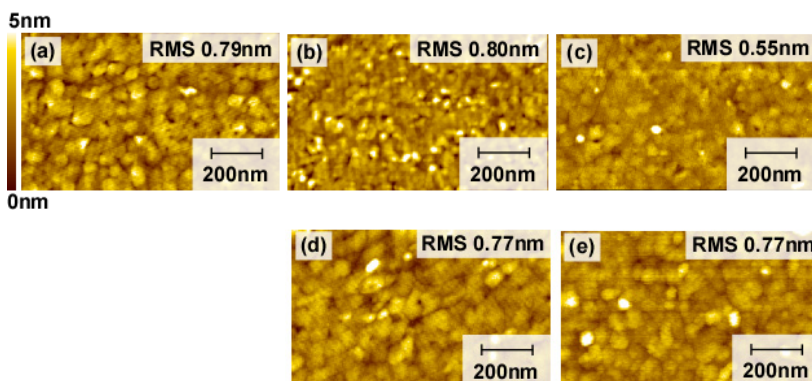


図 4 (a) 熱処理前および異なる温度で 1 時間真空熱処理((b) 250 °C、(c) 300 °C、(d) 350 °C、(e) 400 °C)した Al/Ge(111)構造の AFM 表面形状像。

られない。したがって、エピタキシャル成長した Al 薄層中への Ge 原子の混入は XPS 分析の検出限界以下 (<1 at.%) である。このことは Al と Ge の相図で表される Al 中の Ge の固溶限が非常に小さいこととも一致する。また、真空熱処理前後のどの試料においても、Al 酸化成分が観測された。Ge が Al 表面に析出



することをより詳しく調べるため、XPS 内殻光電子信号の光電子脱出角度依存性から、化学構造の深さ方向プロファイルの評価した。前述した結果において、析出した Ge の酸化成分が認められず表面平坦化が進行した 300 °C で真空熱処理した試料の Al2p および Ge3d 内殻光電子スペクトルを図 6 に示す。各光電子信号の強度は、Al 薄層に相当する Al2p 信号の Al-Al 結合成分を一致させた。光電子脱出角度を浅くし、表面敏感測定にすることで、Al-O 結合成分が増大する(図 6(a))。このことから、エピタキシャル成長した Al 薄層よりも表面側に Al 酸化物が形成していることが示唆される。また、Ge 3d 信号の Ge-Ge 結合成分においても、表面敏感測定で信号強度が増大するが、その増加割合は Al-O 結合成分の場合よりも小さい。したがって、Al 酸化物と Al 薄層の間に Ge が析出している可能性が高い(図 6(b))。また、Al 薄層に相当する Al-Al 結合成分と析出した Ge 層である Ge-Ge 結合成分の光電子強度比から、Al 薄層と析出した Ge 層の光電子脱出深さをそれぞれ 3.085nm と 2.899nm とし、析出した Ge 層の厚さを大まかに見積もった[13]。その結果、析出した Ge 層はおよそ 0.8nm であり、原子数層分の極薄層の形成が可能であることがわかった。

Al 薄層表面に偏析した Ge 層の結晶性を調べるため、真空熱処理前後の試料において、波長 532nm のレーザー光で励起したラマン散乱スペクトルを図 7 に示す。このとき、光学定数より見積もった Al に対するレーザー光の侵入長はおよそ 8nm であり、厚さ 50nm の Al 薄層では Ge 基板からの信号が検出されないことを確認している。300 °C の真空中熱処理により析出した Ge は、 $300\text{cm}^{-1}$  に結晶成分に相当する TO フォノン信号が観測され、結晶性の高い Ge 層が析出していることが示唆される。さらに、300 °C で真空中熱処理した試料の断面 TEM 観察の明視野像を図 8 に示す。Al 薄層に相当する領域で、Al 原子が規則的に配列していることから、EBSD 分析結果と同様に、

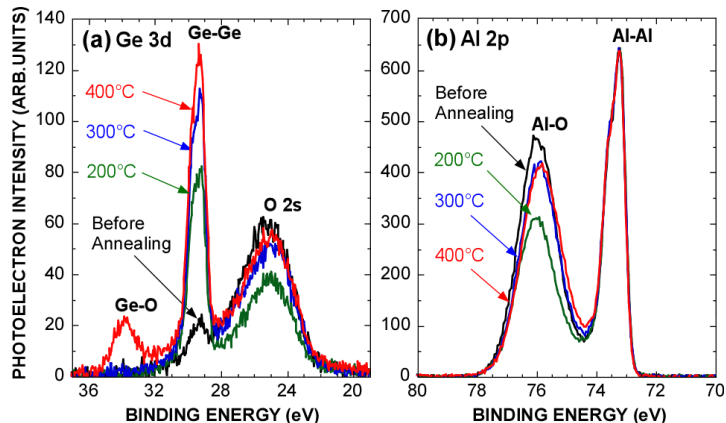


図 5 厚さ~50nm の Al/Ge(111)構造における真空熱処理前後に測定した (a) Ge 3d および(b) Al 2p XPS 内殻光電子スペクトル。各スペクトルは、光電子脱出角度 90° で測定し、それぞれの信号強度は Al 2p 信号の Al-Al 結合で一致させた。

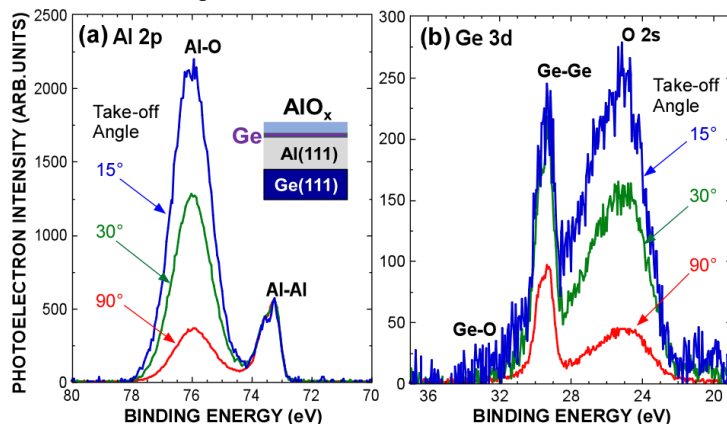


図 6 300 °C で真空熱処理した Al/Ge(111)構造の(a)Al 2p および(b)Ge 3d XPS 内殻光電子スペクトルの光電子脱出角度依存性。各スペクトルの信号強度は、Al 2p 信号の Al-Al 結合で一致させた。

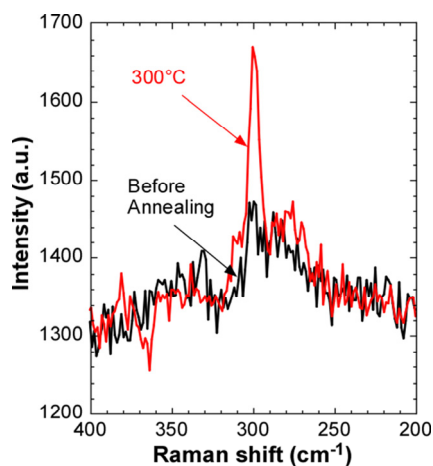


図 7 300 °C の真空熱処理前後の Al/Ge(111)構造のラマン散乱スペクトル。

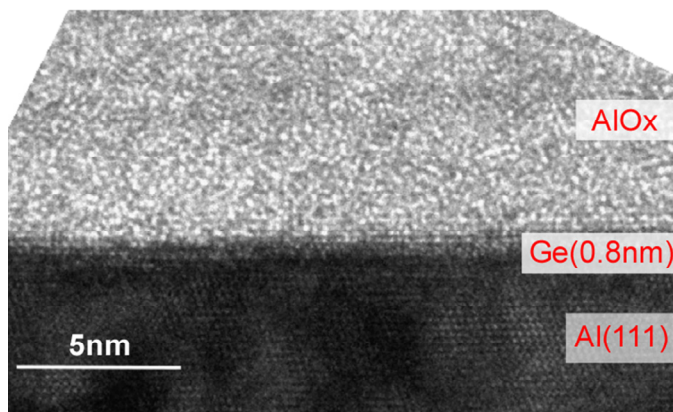


図 8 300 °C で 1 時間真空熱処理した Al/Ge(111)構造の観察した断面 TEM の明視野像。

Ge(111)基板上にAl薄層がヘテロエピタキシャル成長していることが確認される。しかしながら、Al薄層に相当する領域のコントラストが一様でないことから、膜中に結晶欠陥が存在することが示唆される。また、Al酸化膜とAl薄層の間ではラフネスに起因して界面を一意的に判別することは困難であるが、界面近傍の領域においても原子が規則的に配列しており、ラマン分析やXPS分析結果を考慮すると、結晶性の高い極薄GeがAl薄層表面に析出している可能性が高い。したがって、Al-Ge系において、熱処理による原子拡散や表面偏析を促すことは、極薄層や二次元結晶の形成に有望であると考えられる。

上述した成果より更なるGe析出の精密制御と試料表面平坦化がすることを旨として、300°Cよりも低温での作製プロセスと、Ge(111)ウェハの真空熱処理による表面清浄化、Al堆積時の基板加熱により下地テンプレートとなるAl薄層の品質向上を試みた。図9に、基板温度が室温または100°Cで形成したAl/Ge(111)構造のAFM表面形状像を示す。室温に比べて100°CでAl層を堆積することで表面の凹凸が減少し、そのRMSは0.9nmから0.3nmまで低減することが分かった。Al堆積中の基板加熱によるAl原子のマイグレーションにより、表面平坦化が進行したと考えられる。このとき、別途行った光電子分光(XPS)測定より、100°CでAl層を堆積した試料では、自然酸化に相当するAl酸化膜とAl層の間におよそ0.5nm程度の厚さのGeが析出していることが分かった。図9と同様の試料において、入射角0.4°でX線を入射したIn-plane X線回折(XRD)より、析出したGeの試料表面に対して垂直な格子面の結晶性を調べた(図10)。In-plane測定におけるX線の侵入深さ(~数nm)であり、室温でAl層を堆積した試料では顕著なピークは認められないが、基板温度100°Cにした場合にはダイヤモンド構造のGe(220)に由来する鋭いピークが観測された。このことは、表面偏析したGeは試料表面と平行に(111)が配向していることを示唆しており、100°Cという低温にも関わらず極薄のGe結晶が成長することを明らかにした。

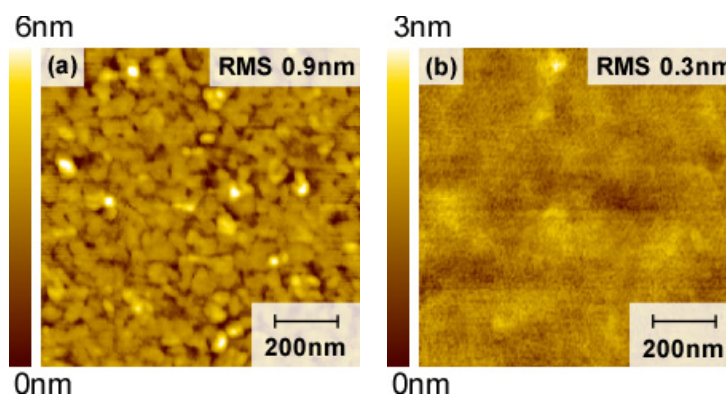


図9 (a)化学溶液処理もしくは(b)真空熱処理によるGe(111)ウェハ表面の清浄化した後、厚さ40nm程度のAl薄層を堆積し300°Cで真空熱処理したAl/Ge(111)構造のAFM表面形状像。

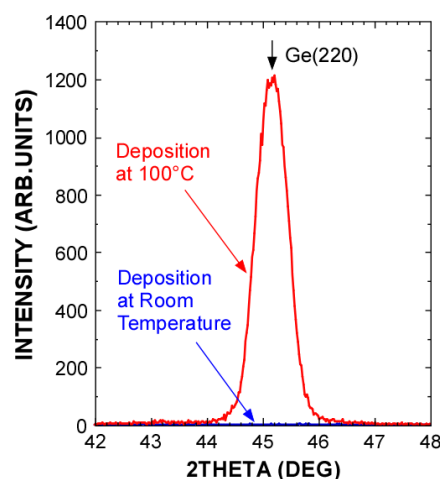


図10 真空熱処理により表面を清浄化したGe(111)上に室温または100°Cの基板温度でAlを堆積したAl/Ge(111)構造のXRD In-plane 2θ測定

#### <引用文献>

- [1] K. Takeda and K. Shiraishi, "Theoretical possibility of stage corrugation in Si and Ge analogs of graphite," *Phys. Rev. B*, vol.50, pp.14916-14922, 1994.
- [2] Z. Shao, X. Ye, L. Yang, and C. Wang, "First-principles calculation of intrinsic carrier mobility of silicene," *J. Appl. Phys.*, vol.114, pp.093712-1-093712-3, 2013.
- [3] X. Ye, Z. Shao, H. Zhao, L. Yang and C. Wang, "Intrinsic carrier mobility of germanene is larger than graphene's: first-principle calculations," *RSC Adv.*, vol.4, pp.21216-21220, 2014.
- [4] K. Ito, A. Ohta, M. Kurosawa, M. Araidai, M. Ikeda, K. Makihara and S. Miyazaki, "Growth of two-dimensional Ge crystal by annealing of heteroepitaxial Ag/Ge(111) under N<sub>2</sub> ambient," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.57, 06HD08, 2018.
- [5] J. Yuhara, H. Shimazu, K. Ito, A. Ohta, M. Araidai, M. Kurosawa, M. Nakatake, and G. L. Lay, "Germanene Epitaxial Growth by Segregation through Ag(111) Thin Films on Ge(111)," *ACS Nano*, vol.12, pp.11632-11637, 2018.
- [6] T.B. Massalski, "Binary Alloy Phase Diagrams," American Society for Metals, vol.i and ii, 1986.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kobayashi Masato, Ohta Akio, Kurosawa Masashi, Araidai Masaaki, Taoka Noriyuki, Simizu Tomohiro, Ikeda Mitsuhsa, Makihara Katsunori, Miyazaki Seiichi	4. 巻 59
2. 論文標題 Formation of ultrathin segregated-Ge crystal on Al/Ge(111) surface	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SGGK15 ~ SGGK15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.35848/1347-4065/ab69de	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 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 M. Kobayashi, A. Ohta, M. Kurosawa, M. Araidai, M. Ikeda, N. Taoka, T. Shimizu, K. Makihara, and S. Miyazaki
2. 発表標題 Growth of Hetero-epitaxial Al on Ge(111) and Segregation of Ge Crystal by Annealing
3. 学会等名 32th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Kobayashi, A. Ohta, M. Kurosawa, M. Araidai, M. Ikeda, N. Taoka, T. Shimizu, K. Makihara, and S. Miyazaki
2. 発表標題 Growth of Ultrathin Segregated-Ge Crystal on Al/Ge(111) Surface
3. 学会等名 2019 International Conference of Solid State of Device and Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Araidai, M. Kurosawa, A. Ohta, and K. Shiraishi
2. 発表標題 First-Principles Study on Formation of Freestanding Silicene and Germanene
3. 学会等名 2019 International Conference of Solid State of Device and Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 征登、大田 晃生、田岡 紀之、池田 弥央、牧原 克典、宮崎 誠一
2. 発表標題 Al/Ge(111)の表面偏析制御による極薄Ge結晶形成
3. 学会等名 2020年 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林 征登、大田 晃生、田岡 紀之、池田 弥央、牧原 克典、宮崎 誠一
2. 発表標題 Al/Ge(111)構造で生じる表面偏析を利用した極薄Ge結晶形成
3. 学会等名 第19回 日本表面科学会中部支部・学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 征登、大田 晃生、黒澤 昌志、洗平 昌晃、田岡 紀之、池田 弥央、牧原 克典、宮崎 誠一
2. 発表標題 熱処理によるAl/Ge(111)上の極薄Ge層形成
3. 学会等名 電気通信情報学会(SDM) [シリコン材料・デバイス] シリコンテクノロジー分科会 6月度合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Ohta K. Ito, M. Kurosawa, M. Araidai, M. Ikeda, K. Makihara, and S. Miyazaki
2. 発表標題 Ge 2D Crystal Growth on Hetero-epitaxial Ag/Ge(111) by N2 Annealing
3. 学会等名 49th IEEE Semiconductor Interface Specialists Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Araidai, M. Kurosawa, A. Ohta, and K. Shiraishi
2. 発表標題 First-Principles Study on Hydrogen Adsorption and Desorption of Silicene and Germanene
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) in conjunction with 26th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM26) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林 征登、大田 晃生、黒澤 昌志、洗平 昌晃、田岡 紀之、池田 弥央、牧原 克典、宮崎 誠一
2. 発表標題 ヘテロエピタキシャルAl/Ge(111)上に偏析した極薄Geの化学分析
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 征登、大田 晃生、黒澤 昌志、洗平 昌晃、田岡 紀之、池田 弥央、牧原 克典、宮崎 誠一
2. 発表標題 エピタキシャルAl/Ge(111)の形成と真空中熱処理による表面平坦化およびGe析出
3. 学会等名 応用物理学会SC東海地区学術講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大田 晃生
2. 発表標題 Two Dimensional Ge Crystal Growth by Annealing of Metal/Ge Stack
3. 学会等名 第2回「ポストグラフェン材料のデバイス開発研究会」(招待講演)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 黒澤 昌志
2. 発表標題 Why chose a diffusion method towards creation of silicene & germanene
3. 学会等名 第2回「ポストグラフェン材料のデバイス開発研究会」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 洗平 昌晃
2. 発表標題 First-principles study on hydrogen adsorption-desorption property and simulated STM Images of germanene
3. 学会等名 第2回「ポストグラフェン材料のデバイス開発研究会」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林 征登、大田 晃生、黒澤 昌志、洗平 昌晃、池田 弥央、牧原 克典、宮崎 誠一
2. 発表標題 真空蒸着によるGe(111)上のAlヘテロエピタキシャル成長
3. 学会等名 2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 洗平 昌晃
2. 発表標題 IV族二次元結晶の電子状態・水素吸脱着に関する第一原理計算
3. 学会等名 第1回 日本表面真空学会若手研究会(招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 黒澤昌志, 大田晃生	4. 発行年 2020年
2. 出版社 (株)エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 10
3. 書名 「共晶系で生じる析出現象を応用したIV族系ナノシート形成技術」、ポストグラフェン材料の創製と用途開発最前線 -二次元ナノシートの物性評価、構造解析、合成、成膜プロセス技術-	

〔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 分担者	黒澤 昌志  (Kurosawa Masashi)  (40715439)	名古屋大学・工学研究科・講師   (13901)	
研究 分担者	洗平 昌晃  (Araidai Masaaki)  (20537427)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教   (13901)	