

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02169

研究課題名(和文) 絶縁性基板上的ゲルマニウム二次元結晶の創製と電子物性の解明

研究課題名(英文) Formation and Characterization of Germanium Two-Dimensional Crystal on Insulating Substrate

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) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：絶縁性基板であるSapphire上に極薄Ge結晶、究極的にはGe二次元結晶を形成することを目的とし、研究を推進した。Sapphire(0001)は熱処理により清浄かつ平坦な基板表面を得る技術が確立されていることに加えて、その表面の原子配列はGe(111)の成長に適している。そこで、Sapphire上にRFマグネトロンスパッタによりGe薄膜を形成し、熱処理によるGe薄膜の結晶化や熱酸化による薄膜化を行い、その結晶構造や表面平坦性を評価した。特に、Ge薄膜堆積時の基板加熱の効果や、アモルファスGe薄膜の固相結晶化、Geの融点付近の温度での短時間熱処理による溶融結晶化を調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微細で高性能な電子デバイスを実現する材料として、二次元結晶が期待されている。本研究ではグラフェンを構成する炭素(C)と同じ14族の元素であるゲルマニウム(Ge)において、その極薄結晶、究極的には二次元結晶を、絶縁性基板上に形成することを目的として研究を推進し、数ナノメートルのGe薄膜の固相結晶化では、結晶核生成と成長を意図した二段階の熱処理をすることが有効であることなど有意義な知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Formation of ultrathin and two-dimensional Ge crystals on sapphire substrate has been studied in this work. Sapphire(0001) substrate is one of the attracting insulating substrate from the viewpoints of surface flattening process by thermal annealing and good Ge(111) crystalline growth template due to its surface structure. Ge thin layer was deposited on sapphire (0001) by RF sputtering and crystallized by thermal annealing in N₂ ambient. Effect of substrate heating during Ge deposition, solid phase and melting crystallization of Ge thin layer have been evaluated.

研究分野：半導体工学

キーワード：ゲルマニウム サファイア 極薄膜 二次元結晶 結晶化

1. 研究開始当初の背景

微細で高性能な電子デバイスを実現する材料として、二次元結晶が期待されている。様々な二次元結晶の中でも、炭素(C)原子が蜂の巣状に配列した原子一層分の厚みのグラフェンは、その構造に起因する特殊な電子状態によって優れたキャリア輸送特性を示すことが知られている。Cと同じ14族の元素で、Cよりも原子番号の大きいゲルマニウム(Ge)においても、ゲルマネンと呼ばれる蜂の巣状の二次元結晶が存在する。興味深いことに、ゲルマネンは、グラフェンと同等の高いキャリア移動度を有することや、強いスピン軌道相互作用により量子スピンホール効果が発現することが理論予測されている。ゲルマネンは、2014年に超高真空中で清浄化したAu(111)やPt(111)基板表面上で、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形成できることが報告された。しかし、金属基板上に形成したゲルマネンは下地基板との強い相互作用があることから、絶縁性基板上での二次元結晶の形成が望まれている。また、CやGeと同じ14族元素のシリコン(Si)は、現在の大規模集積回路(ULSI)となる基盤材料であるため、Geも最先端の電子デバイスとの親和性が高い。バルクにおいても、GeはSiよりもキャリア移動度が大きく、低消費電力かつ高速動作が可能なチャネル材料として注目されており、絶縁性材料上の単結晶Geの形成が行われてきた。Ge結晶を成長する絶縁性基板として、様々な材料が検討されているが、光透過率が高いことや熱膨張率がGeに近いことから、Sapphireが候補の一つとして挙げられる。Sapphireはコランダム構造の単結晶であり、Sapphire(0001)がGe(111)の成長テンプレートとして用いられた実績がある。しかしながら、Sapphire基板上のナノメートルスケールの極薄Ge結晶の形成に関する知見は乏しい。

2. 研究の目的

本研究では、絶縁性基板であるSapphire上に、極薄Ge結晶、究極的にはGe二次元結晶を形成することを目的とした。Sapphire(0001)は単結晶の絶縁性基板であり、熱処理により清浄かつ平坦な基板表面を得る技術が確立されていることに加えて、その表面の原子配列はGe(111)の成長に適している。そこで、原子層レベルで平坦化したSapphire(0001)上にRFマグネトロンスパッタによるGe薄膜を形成し、熱処理によるGe薄膜の結晶化やサブナノメートルまでの薄膜化を行い、その結晶構造や表面平坦性を評価した。具体的には、Ge薄膜堆積時の基板加熱の効果や、アモルファスGe膜の熱処理による固相結晶化、Geの融点(938°C)付近の温度での短時間熱処理による溶融結晶化を調べた。

3. 研究の方法

厚さ~330 μmのSapphire(0001)ウェハを、アセトンによる超音波洗浄と窒素雰囲気中1050°Cで5時間の熱処理を行い、ウェハ表面の清浄化と平坦化を行った。その後、RFマグネトロンスパッタリング(Ar流量:7 sccm、圧力:~0.9 Pa、投入電力密度:2.47 W/cm²)により、室温でGe薄膜をSapphire上に堆積した。一部の試料は、サファイア基板を加熱してGe堆積を行った。熱処理時の保護膜として、bis-(diethylamino)-silane (BDEAS)ガスと酸素プラズマを用いた原子層制御CVD(ALD)により、基板温度300°Cで厚さ~15 nmのSiO₂を堆積した。さらに、Geの融点(938°C)に近い高温の熱処理では、Tetraethoxysilane(TEOS)ガスと酸素プラズマを用いたCVDにより基板表面温度350°Cで厚さ~200nmのSiO₂を追加で堆積した。その後、Ge薄膜の結晶化のために窒素雰囲気中で熱処理を行った。作製した試料の表面形状は、Siカンチレバーを用いてタッピングモードで走査した原子間力顕微鏡(AFM)により計測した。また、波長532 nmの半導体レーザー(5mW)で励起したラマン散乱スペクトルよりGe薄膜の結晶性を評価した。

4. 研究成果

表面清浄化したSapphire(0001)上に、室温もしくは基板加熱して厚さ18nmのGe薄膜をスパッタで堆積した。図1にラマン散乱スペクトルのGe堆積時の基板表面温度依存性を示す。図中のスペクトルはGe信号積分強度で補正した。室温および380°Cの加熱では結晶Ge(c-Ge)に相当する300cm⁻¹付近の信号は検出されず、アモルファスGe(a-Ge)成分のみである。400°C以上に加熱することでc-Ge成分が観測され、温度上昇と共にc-Ge成分の強度が増大する。これらのスペクトルをa-Geとc-Ge成分で大まかにピークフィッティングし結晶化率を算出した結果、420°Cで堆積した場合の結晶化率は~96%であり、大部分が結晶成分であった。図2に同様の試料のAFM像を示す。室温で堆積した試料はステップ/テラス構造が見えるほど平坦であるが、基板加熱した場合は突起物が形成する。温度上昇に従いその数が増加することから、核生成した結晶Geに相当することが示唆される。380°Cで堆積した試料では突起物が占める割合は1%にも満たず、AFM測定の内方向の分解能がカンチレバーの先端径(~4nm)分の誤差が生じることを考慮すると、ラマン測定でc-Ge成分が認め

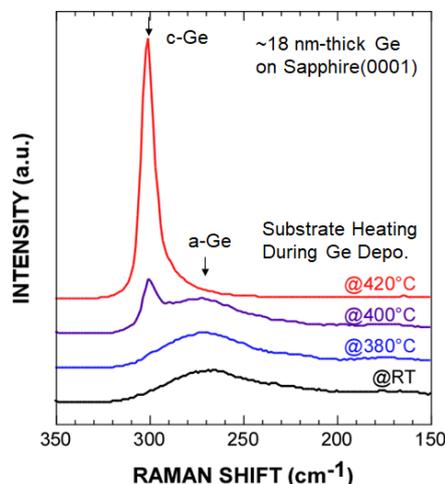


図1 Sapphire(0001)上に室温および基板加熱してGeを堆積した試料のラマン散乱スペクトル

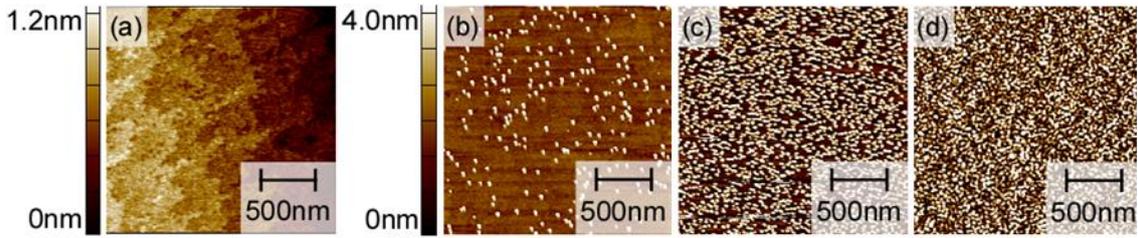


図2 Sapphire(0001)上に(a)室温、(b)380°C、(c)400°C、(d)420°CでGeを堆積した試料のAFM像

られないほど結晶成分はわずかであると解釈できる。したがって、室温の堆積では非常に平坦な a-Ge 膜を形成できるが、基板加熱した場合は、結晶成分の比率が高いものの平坦性は乏しくなる。

そこで、Sapphire(0001)上に室温でスパッタ堆積した a-Ge 膜に対して、熱処理による Ge 薄膜の結晶化を試みた。表面清浄化した Sapphire(0001)および 8nm の Ge 薄膜、15nm の SiO₂ を堆積した試料の AFM 像とその断面プロファイルを図3に示す。Sapphire(0001)表面は非常に平坦であり、ステップ/テラス構造が明瞭に観察された。また、Ge 薄膜および SiO₂ 膜の堆積後においても、その平坦性はほとんど変わらない。図中の A-B 間、A'-B'間、および A''-B''間のラインプロファイルから平均のステップ高さを算出すると、それぞれ、(a)で 0.22±0.03 nm、(b)で 0.22±0.04 nm、(c)で 0.21±0.02nm であった。これらの値は、Sapphire(0006)面の Al 原子-Al 原子間ステップ(または O 原子-O 原子間ステップ)の距離である 0.217nm と、ほぼ一致する。したがって、観測された構造は主に基板に由来するものであり、原子層レベルで平坦な Sapphire 表面に Ge 薄膜と SiO₂ 膜が均一に堆積したことが分かる。

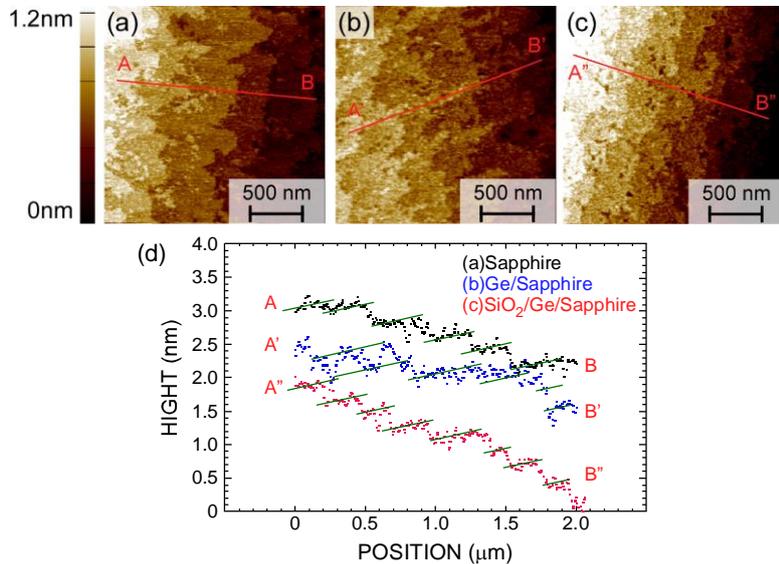


図3 (a)1050°C 熱処理した Sapphire(0001)、(b)Ge 薄膜(8 nm)、(c)SiO₂(15 nm)の各作成過程の AFM 像と(d)ラインプロファイル

次に、SiO₂(15nm)/Ge(8nm)/Sapphire 構造を 650 °C の熱処理前後で測定したラマン散乱スペクトルを図4に示す。各スペクトルは、Ge の TO フォノンモードに相当する信号の積分強度を同じにした。熱処理前では、a-Ge 特有のブロードな信号が~275 cm⁻¹付近に観察される。20分以上の熱処理では、~300 cm⁻¹の c-Ge 成分が顕著に増大する。30分の熱処理により a-Ge 成分は大きく減少し、c-Ge 成分の低波数側にテールが認められる。これは結晶粒間にアモルファスや微結晶相が残留するためと考えられる。また、同様な構造の試料を、600 °C から 900 °C で30分の熱処理を行い、ラマン散乱スペクトルより結晶性を評価した(図5)。600 °C の熱処理では a-Ge 成分が支配的であるが、

650 °C 以上にすることで c-Ge 成分が顕著となる。このとき、熱処理温度と共に、c-Ge 成分のテールが小さくなる傾向がある。また、結晶化率は熱処理温度 650°C では~93%、900°C では~96%であった。これらの結果より、Sapphire(0001) 基板上に形成した厚さ~8 nm の a-Ge 膜の結晶核形成は~650 °C 以上で生じることが分かった。図5のラマン散乱スペクトルに

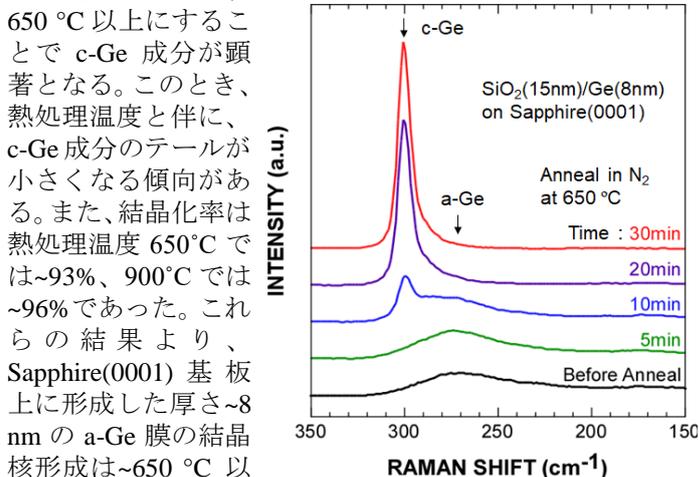


図4 650°C で熱処理した SiO₂(15nm)/Ge(8nm)/Sapphire のラマン散乱スペクトル。

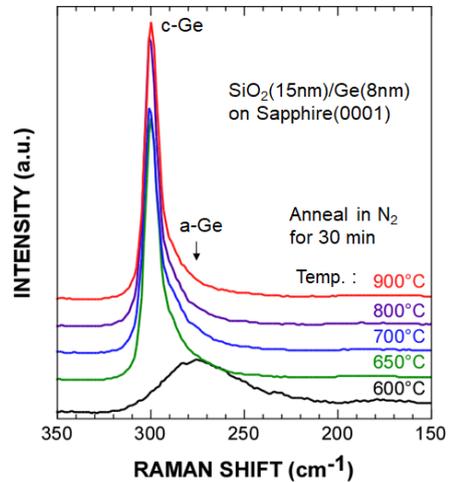


図5 異なる温度で熱処理した SiO₂(15nm)/Ge(8nm)/Sapphire のラマン散乱スペクトル。

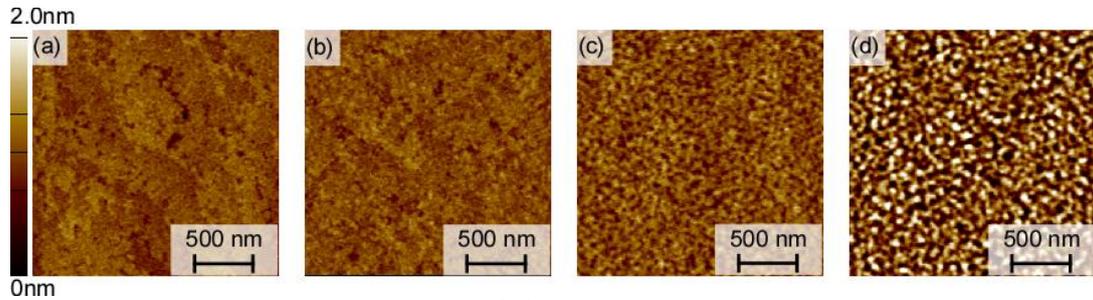


図7 SiO₂(15nm)/Ge(8nm)/Sapphire 構造を窒素雰囲気中(a)650°C、(b)700°C、(c)800°C、(d)900°Cで30分熱処理した試料のAFM像

において、c-Ge成分のピーク位置とその半値幅(FWHM)に相当する最大信号強度の半分の位置を調べ、熱処理温度に対してまとめた(図6)。熱処理温度の増大に伴い、c-Ge成分は低波数側へわずかにシフトする。このシフトを引き起こす原因として、格子不整合によるGe薄層の引張応力や微結晶化に伴う測定中の温度上昇などが考えられるが、半値幅の変化が小さいことから応力の影響が強いと推測される。最も結晶化率が高い900°Cの試料の半値幅は $\sim 1.7\text{cm}^{-1}$ であり、Ge(111)基板の結果と比べて大きいことから、多結晶Geの形成が示唆される。したがって、Ge薄層の結晶性向上には、核生成サイトの制御による大きな結晶粒の形成が重要となる。また、Ge TOフォノンモードに対応する信号の積分強度は、熱処理温度の上昇に伴い減少することから、Geの酸化、SiO₂へのGe拡散、GeOの脱離などのGe薄層とSiO₂との化学反応の進行が示唆された。図7に、図5および6に示す熱処理前後の試料のAFM像を示す。650°Cおよび700°Cで熱処理では、熱処理前と同様なSapphire基板由来のステップ/テラス構造が観測できる。一方、800°C以上の熱処理では、表面荒れが生じた。これはGeがSiO₂中を拡散したと考えられ、高温の熱処理ではSiO₂の劣化や界面での組成ミキシングが懸念される。

上述した結果を考慮して、SiO₂/Ge/Sapphire構造において、二段階の熱処理によるGe薄層の結晶化を検討した。ここでは、厚さ $\sim 6\text{nm}$ のGe薄層を用いた。まず、660°Cで3時間の熱処理によりGe薄層に結晶核の形成を行い、続いて640°Cで3時間もしくは9時間の熱処理を行うことで、Ge薄層の結晶化を狙った。比較実験として、640°Cもしくは660°Cで3時間の熱処理のみ行った試料も作成した。図8に示す各試料のラマン散乱スペクトルにおいて、660°Cの熱処理のみでは、c-Ge信号がわずかに観測され、640°Cのみではc-Ge信号は検出できない。前述したGe薄層の厚さが $\sim 8\text{nm}$ の試料のラマン散乱スペクトルと比較すると、c-Ge成分とa-Ge成分の比率はGe薄層の厚さと熱処理温度の両方に強く依存すると考えられる。興味深いことに、660°Cと640°Cの二段階で熱処理した場合は、a-Ge成分の減少とともにc-Ge成分が大幅に増加する。二段階目の熱処理を9時間行った試料では、c-Ge成分の結晶化率 $\sim 92\%$ であり、その半値幅も $\sim 7.5 \pm 1.4\text{cm}^{-1}$ であることから、結晶粒径の増大を示唆された。これらの二段階熱処理した試料のAFM像を図9に示す。二段階目の熱処理時間が3時間に比べ9時間だと若干の表面荒れが認められるものの、その平均二乗粗さ(RMS)は $\sim 0.36\text{nm}$ であり、窒素雰囲気中900°Cで30分熱処理を行った試料(RMS: $\sim 0.40\text{nm}$)よりも小さく、表面平坦性を大きく乱すことなく結晶性の高いGe薄層を形成できたことがわかる。したがって、高温での熱処理による結晶核の生成と低温での熱処理による結晶化の促進を組み合わせ、二段階の熱処理を行うことが、Sapphire基板上的の高品質なGe薄層の固相結晶化において効果的である。

SiO₂(15 nm)/Ge(6 nm)/Sapphire構造を660°Cで3時間と640°Cで6時間の順に熱処理することでGe薄層

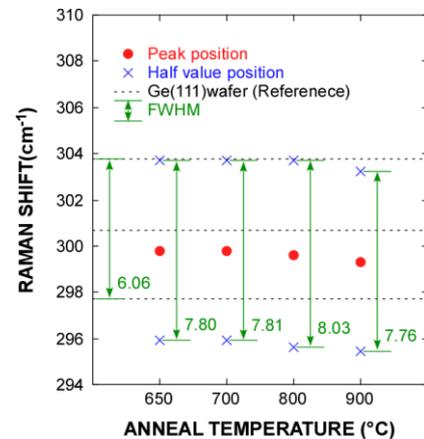


図6 図5に示すラマン散乱スペクトルのc-Ge成分の半値幅およびピーク位置。破線にGe(111)基板の結果を示す。

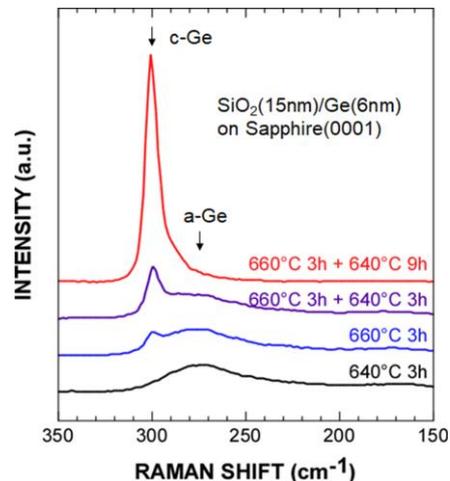


図8 二段階で熱処理したSiO₂(15 nm)/Ge(6 nm)/Sapphire構造のラマン散乱スペクトル。

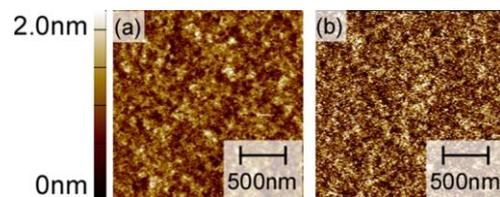


図9 窒素雰囲気中660°Cで3時間の熱処理後、640°Cで(a)3時間および(b)9時間の二段階で熱処理を行った試料のAFM像。

を結晶化し、さらに500°Cで熱酸化によりGe薄膜を薄くすることを試みた。図10に、酸化過程で測定したラマン散乱スペクトルのc-Ge成分の積分強度より算出したGe薄膜の厚さを示す。酸化時間に対して、Ge膜厚はほぼ線形にゆるやかな速度で減少し、840分の酸化で、おおよそ~1nmとなる。このことから、酸化膜中に拡散した酸素原子とGe

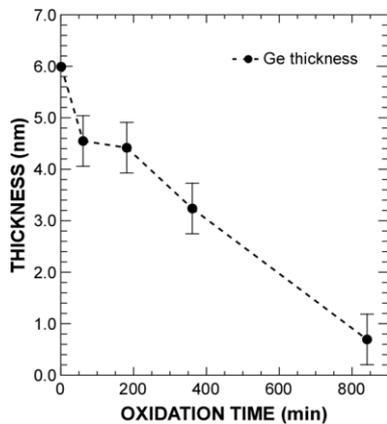


図10 二段階で熱処理した厚さ6nmのGe薄膜の500°Cの熱酸化によるGe膜厚の変化。

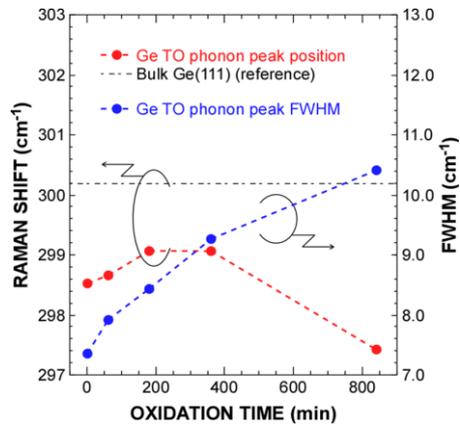


図11 二段階で熱処理した厚さ6nmのGe薄膜の熱酸化過程で計測したc-Ge成分の半値幅およびピーク位置。

原子の反応に律速して酸化が進行したと考えられる。図11にc-Ge成分の半値幅およびピーク位置を酸化時間に対してまとめた。c-Ge成分のピーク位置は360分までの酸化では徐々に高波数側へシフトし、840分の酸化では低波数側へ大きくシフトする。また、酸化の進行に従い、c-Ge成分の半値幅が増大する。加えて、酸化膜との界面からの影響を受けた弱い結合に起因すると考えられるc-Ge成分よりも低波数側に信号は強度が減少することから、Ge薄膜の酸化がLayer-by-Layerではなく、結晶粒界などを介して不均一に酸化が進行したことが懸念される。そのため熱酸化による数nmまでGeを薄膜化する場合は、更なる結晶性の向上が必要だと考ええる。

最後に、更なる結晶化を目指しGe薄膜の熔融結晶化について調べた。SiO₂(CVD 200nm+ALD 15nm)/Ge(6nm, 18nm, 36nm)/Sapphireを100°C/分から500°C/分のレートで940°Cまで昇温し、同じレートで降温した試料の光学顕微鏡像を図12に示す。この際、940°Cまでの昇温前に400°Cで1時間の予備加熱を行った。厚さ~18nmのGe膜では、昇温・降温レートが200°C/分では顕著な変化は認められないのに対して、300°C/分の場合はき裂が観測された。また、Ge膜を~36nmに厚くすると、100°C/分でき裂が生じた。これはGe膜厚の増加と共に、熱膨張によりSiO₂/Ge界面の歪が大きくなることに起因すると考えられる。一方、Ge膜を~6nmまで薄くすると、500°C/分であってもき裂が生じず、観察範囲内で一様なコントラストであった。940°Cで熱処理した厚さ6nmのGe膜を用いた試料のラマン散乱スペクトルを図13に示す。図中にはGe(111)基板と、660°Cで3時間と640°Cで9時間の二段階熱処理した試料のスペクトルも比較として示す。二段階の熱処理では、結晶Ge成分の低波数側に残留アモルファスもしくは微結晶成分に起因するテールが存在する。一方、厚さ6nmのGe層の熔融結晶化した試料のラマン散乱分光分析では、結晶Geに相当する対称性の高い鋭いピークが観測され、その半値幅はGeウェハと同等の5.8cm⁻¹であった。また、図14に示すAFM像で、その表面のRMS値は~0.3nmであり、熱処理による表面荒れはほぼないと考えられる。したがって、融点に近い940度の熱処理において、~200nmのSiO₂膜を用いることで、Ge薄膜の消失を防ぎ、平坦で高品質なGe結晶が形成できることが分かった。

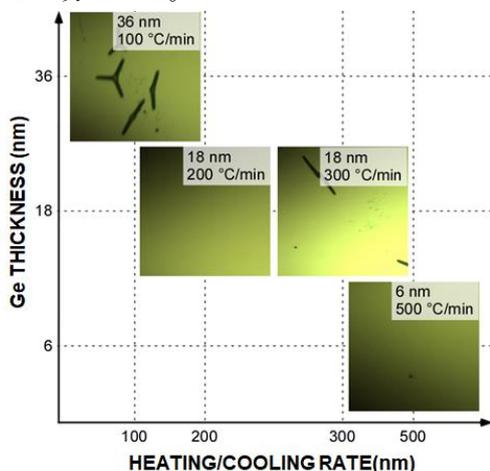


図12 SiO₂(CVD 200nm + ALD 15nm)/Ge(6nm, 18nm, 36nm)/Sapphire構造に対して、昇温・降温レートを変えて熱処理した試料の光学顕微鏡像。

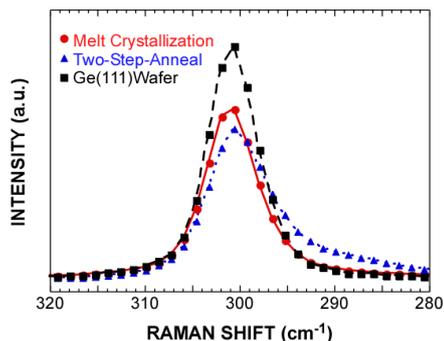


図13 500°C/分で940°Cの熱処理を行ったSiO₂(CVD 200nm+ALD 15nm)/Ge(6nm)/Sapphireのラマンスペクトル。二段階熱処理(660°C 3時間、640°C 9時間)およびGe(111)基板の結果を比較として示す。

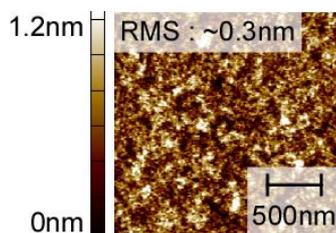


図14 図13に示す940°Cで熱処理した試料のAFM像。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Sugawa Hibiki, Ohta Akio, Kobayashi Masato, Taoka Noriyuki, Ikeda Mitsuhsa, Makihara Katsunori, Miyazaki Seiichi	4. 巻 98
2. 論文標題 Crystallization of Ge Thin Films on Sapphire(0001) by Thermal Annealing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 505 ~ 511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1149/09805.0505ecst	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 Ohta Akio, Imagawa Takuya, Taoka Noriyuki, Ikeda Mitsuhsa, Makihara Katsunori, Miyazaki Seiichi	4. 巻 60
2. 論文標題 Energy band diagram for SiO ₂ /Si system as evaluated from UPS analysis under vacuum ultraviolet with variable incident photon energy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SAAC02 ~ SAAC02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abb75b	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 Ohta Akio, Ikeda Mitsuhsa, Makihara Katsunori, Miyazaki Seiichi	4. 巻 59
2. 論文標題 Complex dielectric function of Si oxide as evaluated from photoemission measurements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SMMB04 ~ SMMB04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab8c99	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 Matsushita Keigo, Ohta Akio, Taoka Noriyuki, Hayashi Shohei, Makihara Katsunori, Miyazaki Seiichi	4. 巻 61
2. 論文標題 Impact of substrate heating during Al deposition and post annealing on surface morphology, Al crystallinity, and Ge segregation in Al/Ge(111) structure	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac5fbc	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12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 H. Sugawa, A. Ohta, M. Kobayashi, N. Taoka, M. Ikeda, K. Makihara, and S. Miyazaki
2. 発表標題 Crystallization of Ge Thin Films on Sapphire(0001) by Thermal Annealing
3. 学会等名 PRIME 2020 (ECS, ECSJ, & KECS Joint Meeting) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須川 響、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 Sapphire(0001)上アモルファスGe 薄膜の固相結晶化
3. 学会等名 電子デバイス界面テクノロジー研究会 材料・プロセス・デバイス特性の物理 (第26回)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Ohta, M. Ikeda, K. Makihara, and S. Miyazaki
2. 発表標題 Evaluation of Valence Band Top of Si Surface by Vacuum Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy with Variable Incident Photon Energy
3. 学会等名 12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Ohta, M. Ikeda, K. Makihara, and S. Miyazaki
2. 発表標題 Complex Dielectric Function of Si Oxide as Evaluated from Photoemission Measurements
3. 学会等名 2019 International Workshop on Dielectric Thin Films For Future Electron Devices (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Ohta, M. Ikeda, K. Makihara, and S. Miyazaki
2. 発表標題 Determination of Complex Dielectric Function of Oxide Film from Photoemission Measurements
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 須川 響、大田 晃生、小林 征登、田岡 紀之、池田 弥央、牧原 克典、宮崎 誠一
2. 発表標題 Sapphire(0001)上にスパッタ形成したGe薄膜の結晶化
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 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 XPSによるSi系材料の複素誘電関数・光学定数の評価
3. 学会等名 電子デバイス界面テクノロジー研究会 材料・プロセス・デバイス特性の物理 (第25回)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 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 光電子エネルギー損失信号によるSi系材料の複素誘電関数評価
3. 学会等名 2019年 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Matsushita, A. Ohta, N. Taoka, S. Hayashi, K. Makihara, and S. Miyazaki
2. 発表標題 Impact of Substrate Heating on Surface Flattening and Ge Segregation of Al/Ge(111)
3. 学会等名 2021 International Workshop on Dielectric Thin Films For Future Electron Devices (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井 大希、松下 圭吾、大田 晃生、田岡 紀之、牧原 克典、宮崎 誠一
2. 発表標題 Al/Si(111)上に表面偏析したSiの光電子分光分析
3. 学会等名 2022年 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松下 圭吾、大田 晃生、林 将平、田岡 紀之、牧原 克典、宮崎 誠一
2. 発表標題 基板加熱によるAl/Ge(111)の結晶性・平坦性の制御と熱処理によるGe 表面偏析
3. 学会等名 電子デバイス界面テクノロジー研究会 材料・プロセス・デバイス特性の物理 (第27回)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松下 圭吾、大田 晃生、田岡 紀之、林 将平、牧原 克典、宮崎 誠一
2. 発表標題 基板加熱がAl/Ge(111)構造の表面平坦化とGe偏析に及ぼす影響
3. 学会等名 2021年 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 (分担執筆) 黒澤 昌志 / 大田 晃生 (監修者) 柚原淳司,	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 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、応用展開~ 第3章 二次元ナノシートの成膜プロセス技術 第4節 共晶系で生じる析出現象を応用したIV族系ナノシートの形成技術	

1. 著者名 宮崎誠一, 大田晃生	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 14
3. 書名 「光電子分光(XPS, UPS)」、2020版薄膜作製応用ハンドブック	

〔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	牧原 克典 (Makihara Katsunori) (90553561)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	
研究協力者	田岡 紀之 (Taoka Noriyuki) (50626009)	名古屋大学・工学研究科・特任准教授 (13901)	

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
---------	---------