

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03234

研究課題名（和文）可視光領域の直接ギャップを有するSiGe混晶クラスレートの物性解明

研究課題名（英文）Research on physical properties of SiGe clathrate having direct gap in visible region

研究代表者

久米 徹二（Kume, Tetsuji）

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：30293541

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題の成果は、次世代半導体材料として期待されるSiGeクラスレートについて以下の4つの点において新たな知見を得たことである。1.初めて透明（絶縁）基板の上にGeクラスレート薄膜を形成し、光透過スペクトルを明らかにした。2.SiGe混晶クラスレートの作製に成功し、その最適な合成条件、結晶構造について情報が得られた。3.新しいクラスレート薄膜作製手法を提案し、より高品質な薄膜を短時間で作製に成功した。4.クラスレート薄膜の形成に重要なパラメータを理解した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体産業の根幹をなしているIV族元素Si、Geの新しい結晶構造であるクラスレートは、古くから注目されてきた材料の一つである。本課題により、クラスレートの薄膜状合成に道筋を得たことで、今後この物性を実験的に調べることが可能になった。通常のダイヤモンド構造よりも優れるとされるクラスレートの太陽電池材料としての可能性を見出すことになれば、従来にない安価で高性能の太陽電池材料として半導体産業に大きなインパクトを与えることになる。

研究成果の概要（英文）：The result of this research project is that we have obtained new knowledge about the SiGe clathrate, which is expected as a next-generation semiconductor material, in the following four points. 1. Ge clathrate thin film was formed on a transparent (insulated) substrate, and the light transmission spectrum was clarified for the first time. 2. We succeeded in producing the SiGe clathrate, and obtained information on its optimum synthesis conditions and crystal structure. 3. We proposed a new fabrication method for clathrate thin film and succeeded in producing a higher quality thin film in a short time. 4. We gained insight into the important parameters for the formation of clathrate thin films.

研究分野：半導体工学

キーワード：半導体クラスレート

1. 研究開始当初の背景

Si や Ge 原子は、特殊な合成方法によりかご状のクラスレート構造を形成する。II 型構造のクラスレート (図 1) を形成した場合、通常のダイヤモンド構造とは大きく異なる性質を示す。ダイヤモンド構造では Si は 1.1 eV の間接遷移であるが、クラスレート構造では光学特性に優れた直接遷移となり、そのバンドギャップは $E_g = 1.8$ eV (可視光領域) であると予測されている[1]。さらに、Si と Ge のクラスレートを混晶化して得られる「 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 混晶クラスレート」では、Si/Ge の混晶比(x)に応じて E_g を 0.7-1.8 eV の範囲で制御が可能とされる[2,3]。 $x = 0.5$ とすることで、太陽電池材料として最適な値 $E_g = 1.4$ eV の実現が理論予測されている。

IV族(Si, Ge) の新材料:
構造II型クラスレート(IV_{136})

Si/Geのかご状共有結合結晶
直接遷移、可視光域の E_g

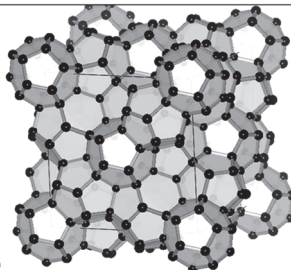
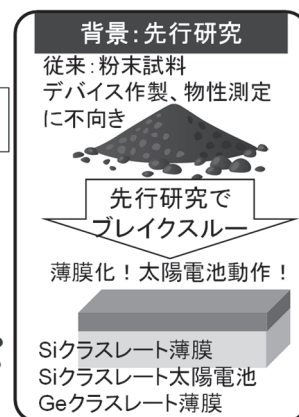


図 1 構造 II 型クラスレートの結晶構造と、先行研究による成果



$\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 混晶クラスレートの太陽電池材料としての特長は以下のようにまとめられる。

- ① $E_g = 1.4$ eV (太陽電池に最適) ② 直接遷移 (吸収係数が大きく薄膜太陽電池に適する)
- ③ IV 族元素 (安価で無毒、環境に優しい) ④ 共有結合結晶 (有機材料や非晶質より高耐久性)

Si および Ge クラスレートは 1960 年代から合成されていたが、粉末状であったため、実験的な物性解明は進んでおらず、デバイスへの応用は全くなされていなかった。近年、米国のグループ[3]が Si クラスレートの薄膜化を試みたが、デバイス作製には至っていない。

我々の研究グループは、先行プロジェクト (JST 戦略的創造研究推進事業 (ALCA)) において、独自に開発した手法により Si クラスレート薄膜[4]、Ge クラスレート薄膜[5]の作製に成功した。このブレイクスルーにより、Si クラスレート薄膜を光吸収層として用いた太陽電池を作製し、Si クラスレートが太陽電池材料として使用できること[4]を世界に先駆けて実証した。しかしながら先行プロジェクトが太陽電池の早急な実用化を目指したものであったため、基礎物性の十分な解明には至っていない。また、より優れた性能が期待できる $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 混晶クラスレートの開発も不十分であった。そこで、これまでの成果を踏まえ、高効率太陽電池の実現を目指し、 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 混晶クラスレートの基礎物性解明に重点を置いた本研究課題の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は「 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 混晶クラスレートの物性を解明し、高効率薄膜太陽電池への応用の指針を示すこと」である。この最終目的に到達するため本課題では、特に下記項目について重点的に研究を行った。

- $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 混晶クラスレート薄膜作製法の確立: 各種基板上に薄膜を作製する技術を確認する。これまでに開発した技術をさらに進め、前駆体 $\text{Na Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ からクラスレート化するプロセスを確立、最適化し、高品質の薄膜を得る。
- 物性解明: 得られた薄膜試料について、光物性測定、電子輸送測定を行い、バンドギャップ、光吸収係、電気伝導度等の知見を得る。

3. 研究の方法

A. $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 混晶クラスレートの作製と構造評価

従来の研究から Si および Ge クラスレートの作製条件は、各々異なっていることが分かっている。したがって組成比 x により最適な作製条件を見出すことが必要となる。本項目において、粉末状の II 型 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 混晶クラスレートの作製とその構造評価を通じて、最適条件を探った。基本的な試料作製は Si、Ge 粉末および塊状 Na を所定のモル比で混合し、加熱することにより前駆体であるジントル相 $\text{NaSi}_x\text{Ge}_{1-x}$ を得る。さらに高真空下における熱処理を施して、 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 混晶クラスレートを得るといったものである。得られた試料は構造、組成について詳しく分析される。

B. ゲストフリー Ge クラスレート薄膜の作製と物性評価

各種物性測定 (光透過測定、電気伝導度測定) を可能にするため、透明絶縁基板 (サファイア基板) 上に Ge クラスレートの作製を試みた。まず、非晶質 Ge をサファイア基板上にスパッタ製膜し、これを出発材料として、Na を Ar 雰囲気下にて反応させ前駆体 NaGe を得る。その後、真空下における熱処理等を施すことにより、ゲストを殆んど含まない Ge クラスレート ($\text{Na}_x\text{Ge}_{136}$) を得る。得られた試料に対して、構造と物性に関する知見を得るため、X 線構造解析、組成分析、光透過率測定、電気伝導度測定等を行った。

C. Si クラスレート薄膜作製法の確立

Si クラスレートに関しては、I 型と II 型が同時に形成してしまう、再現性よく試料が作製できない等の問題が解決されていなかった。我々は、前駆体 NaSi から Si クラスレートへ構造変化を生じる際の Na 蒸気圧に注目し、これを制御することで、I 型、II 型の選択性や再現性の向上を目指した。各種条件で作製した試料は、X 線構造解析、ラマン散乱分光法による構造分析の他、レーザー顕微鏡による表面形状観察をも行った。

D. 新しいクラスレート薄膜作製装置の構築

これまでの Si、Ge クラスレートの作製は、前駆体薄膜 (Si クラスレートの場合 NaSi) を Ar 雰囲気下で Na との反応により作製した後、試料を真空加熱装置へ移して、熱処理を行ってきた。この手法では、試料の移動中などに、雰囲気に含まれる微量の水分や酸素と反応を起こすため良質な薄膜を得ることは困難であった。これを解決するため、すべてのプロセスを真空中で行う事ができるクラスレート試料作製を構築し、作製条件の最適化を目指した。作製された試料は、X 線構造解析、ラマン散乱分光による構造分析、走査型電子顕微鏡による形状観察のほか、光透過率測定、電気伝導度測定などによる物性評価をも行った。

4. 研究成果

A. $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ 混晶クラスレートの作製と構造評価

ゲストフリーの構造 II 型 Si-Ge 合金クラスレート ($\text{Na}_x(\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y)_{136}$ ($x < 1$)) は、以下の 3 段階の手順で作製された。Si、Ge、水素化ナトリウム (NaH) 粉末の混合物を Ar 中で加熱処理し前駆体 ($\text{Na}_4(\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y)_4$ ($y = 0-1$)) を得た後、真空熱処理により Na を内包した Si-Ge 合金クラスレート ($\text{Na}_x(\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y)_{136}$ ($x > 1$)) が得た。さらにイオン液体 (ドデシルトリメチルアンモニウムクロリドと AlCl_3 の混合物) [6,7] を使用した追加処理によりゲストフリーの Si-Ge 合金クラスレート ($\text{Na}_x(\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y)_{136}$, $x < 1$) を得た。

XRD の結果、混晶クラスレート $\text{Na}_x(\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y)_{136}$ は、Si リッチまたは Ge リッチ組成のみ合成されることが確認できた。図 2 は、Ge 組成の関数として示した混晶クラスレート $\text{Na}_x(\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y)_{136}$ の格子定数の変化である。概ね格子定数はベガードの法則に従っているように見える。本研究により、イオン液体法を用いて、Si リッチまたは Ge リッチの組成範囲でのゲストフリー構造 II 型 Si-Ge 合金クラスレートをはじめて合成することに成功した。

B. ゲストフリー Ge クラスレート薄膜の作製と物性評価

透明で絶縁性の基板上への $\text{Na}_x\text{Ge}_{136}$ 膜作製は、以下の手法により行った。サファイア基板上にスパッタ製膜したアモルファス Ge (a-Ge) を Ta りつば内に、Na 塊から 15mm の高さに配置した。図 3 (a) Ta りつばはステンレス鋼の容器に密封され、マッフル炉にて 500°C 、3 時間熱処理することで、前駆体膜が形成される。続いて、グローブボックス内で前駆体薄膜を石英管へ移し、高真空 ($\leq 10^{-4}\text{Pa}$) 下での熱処理を 300°C 、12 時間実施した (図 3 (b))。作製した $\text{Na}_x\text{Ge}_{136}$ 薄膜には、Na 原子がケージ内に含まれている。さらに Na 含有量を減らすために、真空中での熱処理を 280°C で実行された。また、電界の印加による Na の除去に関する新しい試みが行われた。

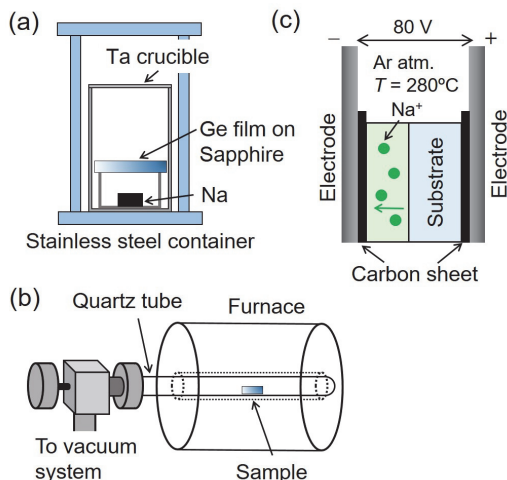


図 3. (a) NaGe の合成に使用されるセットアップの概略図。(b) 高真空下でのアニーリングに使用されるセットアップ。(c) 電界の印加による Na 除去に使用される装置。

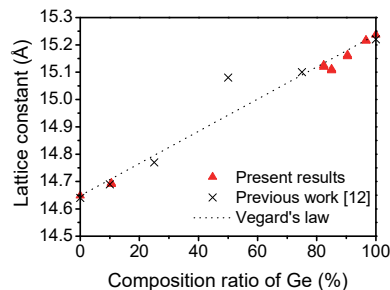


図 2. $\text{Na}_x(\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y)_{136}$ の格子定数と Ge 組成比。挿入図の破線はベガード則を示す。

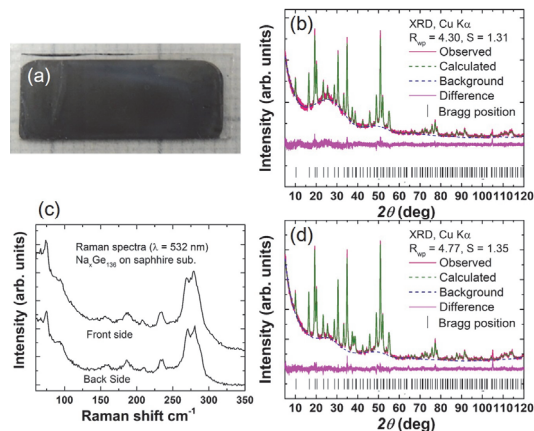


図 4. (a) II 型 Ge クラスレート薄膜試料。(b) XRD とリートベルト解析の結果 (c) 試料の表側と裏側から測定されたラマンスペクトル。(d) ほとんどゲストフリーの構造 II 型 Ge クラスレート薄膜の XRD およびリートベルト解析の結果。

セットアップを図 3 (c) に模式的に示す。試料を挟んだ状態で 80V の DC 電圧を 280°C の乾燥 Ar を満たした密閉容器内で行った。Na イオンはカソードに向かって拡散する。

図 4 (a) に、サファイア基板に作製した Ge クラスレートの写真を示す。図 4 (b) に XRD パターンおよびそのリートベルト解析の結果を示した。すべての回折ピークは、ランダムな結晶方位を持つ多結晶 $\text{Na}_x\text{Ge}_{136}$ 膜に起因している。図 4(c) は、ラマンスペクトルであり、膜全体に渡ってクラスレートが合成されたことを示している。

試料からの Na の除去は、高真空下での熱処理と、電界の印加によって実行され (図 3 (c)) ほとんどゲストフリー ($x=0.0$) の構造 II 型 Ge クラスレート膜を得ることに成功した。

図 5 は、 $\text{Na}_x\text{Ge}_{136}$ の吸光度スペクトルを示す。約 0.45eV 以上のスペクトル領域では、 $x=0.21$

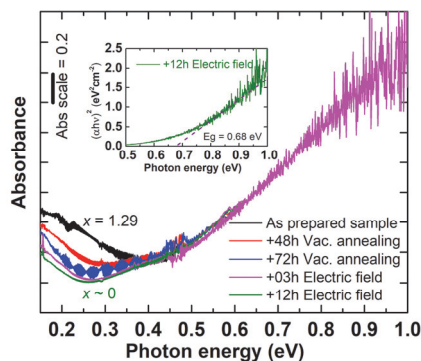


図 5. II 型 Ge クラスレート薄膜試料の光吸収スペクトル。

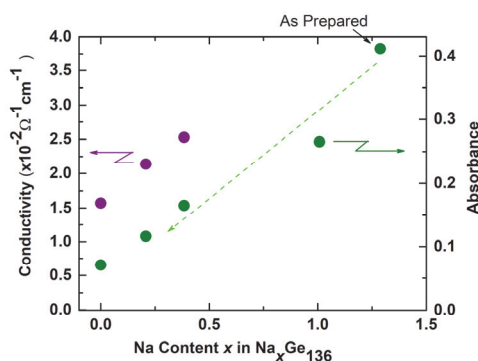


図 6. Na 含有量 x の関数としての導電率 (左側) と 0.2 eV での吸光度 (右側)。

のスペクトルのみを示した。0.5 eV より高いエネルギーで見られる吸収の立ち上がりは、バンド間遷移による基礎吸収に起因し、低エネルギー ($\leq 0.4\text{eV}$) には自由キャリア吸収による。直接バンド間吸収スキームに基づいて、吸収スペクトルを分析した (図 5 の挿入図) とところバンドギャップ値は 0.68 eV と推定される。この値は、粉末試料を使用して得られた理論予測値 (0.81 eV) [9] および実験値 (0.61 eV) [10] に近い値である。図 6 は、van derPauw 法で得られた薄膜試料の電気伝導率を示しており Na 含有量 x の減少に伴う薄膜試料の導電率の減少が観察された。図 6 は、0.2 eV での吸光度の x 依存性もプロットしている。Na 含有量 x が減少すると、導電率と同様に、低エネルギーでの吸収が弱まる。したがって Na 含有量は電気伝導性だけでなく低エネルギー吸収の要因でもあることがはっきりと分かる。

C. Si クラスレート薄膜作製法の確立

構造 I 型 ($\text{Na}_8\text{Si}_{46}$) および構造 II ($\text{Na}_x\text{Si}_{136}$)

Si クラスレートは、次の手順で合成した。図 7

(a) に示すように、Na 塊と NaH 粉末を Ta りつぼの底に置き、Si ウェーハを底から約 10mm 上に置いた。Ta りつぼはステンレス鋼の容器に密封された。これらの操作をグローブボックス内の Ar 雰囲気下で行った後、ステンレス容器を 560°C、12~48 時間加熱した。この Ar 熱処理により、ジントル相前駆体 NaSi の薄膜が形成される。前駆体膜は図 7 (b) に示す石英管に移され、 10^{-3} Pa 以下で 400°C の熱処理を行う。Na が NaSi 前駆体膜から蒸発し、構造 I 型 ($\text{Na}_8\text{Si}_{46}$) または構造 II ($\text{Na}_x\text{Si}_{136}$) の Si クラ

スレート膜に変換される。真空熱処理中の NaSi からの Na の蒸発速度を制御するために、BN 製の蓋付き容器 (図 7 (b)) を使用した。容器は完全に密閉されないため内部は排気されるが、BN

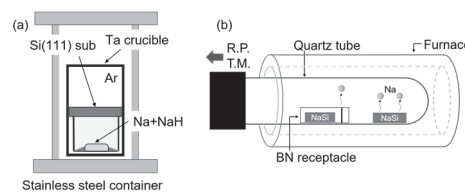


図 7. (a) 前駆体の熱分解のための Ar アニーリングおよび (b) 前駆体からのクラスレートの熱分解のための真空アニーリングに使用される概略セットアップ。

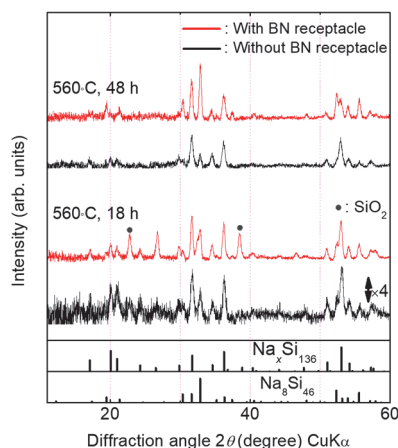


図 8. Si クラスレート膜の XRD パターン。真空熱処理中における BN りつぼ使用、不使用の比較

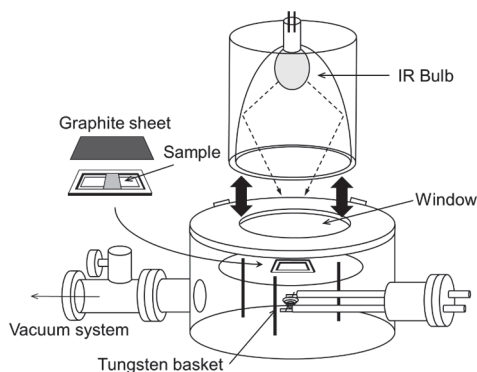


図 9. ポータブル真空およびアニーリングシステム (pVEAS) の概略図。

容器内では Na 蒸気圧は高い為、Na の除去の効率は低いと考えられる。

図 8 は、BN 容器を使用と不使用の場合の XRD パターンである。構造 I 型と II 型の両方の Si クラスレートが、すべての試料で観察されたが、BN 容器を使用した場合、構造 I 型 Si クラスレートがより多く合成されることが分かった。

上述したように、Ar 熱処理と真空熱処理のさまざまな条件を試み、Si 基板上にクラスレートを作製した。Ar 熱処理時間の変化により、膜厚が変化し、より厚い膜は、容易な剥離と粗い表面を生じた。18 時間の Ar 熱処理持続時間は、Si クラスレートの比較的均一な膜をもたらした。BN 容器を使用して行った Na 除去の速度を制御する試により、緩やかな Na 除去は構造 II 型よりも I 型 Si クラスレートの成長をもたらすことが分かった。

D. 新しいクラスレート薄膜作製装置の構築

図 9 に概略的に示されているポータブル真空蒸発および熱処理システム (pVEAS) を開発し、構造 II 型 Ge クラスレート膜合成に適用した。pVEAS はグローブボックス内での操作を可能にするポータブル真空チャンバーと赤外線 (IR) ランプで構成されている。このチャンバには、真空蒸着用電極をも備えているため、Na の真空蒸着と IR ランプの熱処理を同時または連続的に行うことが可能である。

この装置を用いて、作製した試料を図 10a に示す。均一な色合いを示す試料が得られている。XRD ピーク (図 10b) はすべて $\text{Na}_x\text{Ge}_{136}$ に指数付けされ、不純物相は検出されない。図 10c は、基板を介して上面と下面から膜にレーザーを入射させて測定したラマンスペクトルを示しており、膜全体に渡って、II 型 Ge クラスレート構造になっていることが分かる。

pVEAS により $\text{Na}_x\text{Ge}_{136}$ クラスレートの成長過程について図 11 に概略的に示されているように考えることが可能である。最初に、Na 膜が真空蒸着によって a-Ge 膜上に堆積される。IR 加熱を行うと、Na は a-Ge 膜と反応して NaGe 相を形成しつつ、Na が膜表面から蒸発する。したがって、Na の膜厚は、NaGe 相に必要な量よりも十分に厚く、試料表面からの Na の再蒸発を補償する必要がある。NaGe 膜の合成後、膜表面近くにある Na が蒸発し始め、Na がさらに離脱し始める。表面近くの Na 濃度の減少は、内部から表面への Na 拡散につながり、Ge クラスレート合成の開始に寄与する。構造 II 型の Ge クラスレート合成は、基板側から始まり、表面層に向かって伝播すると推測される。

<引用文献>

- [1] Phys. Rev. B **62**, R7707 (2000).
- [2] Nature **443**, 320 (2006).
- [3] J. Mater. Chem. C **2**, 3231 (2014).
- [4] Thin Solid Films **609**, 30 (2016).
- [5] CrystEngComm. **18**, 5630 (2016).

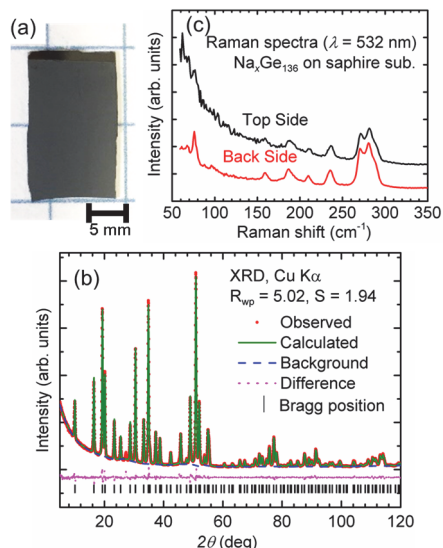


図 10. (a) サファイア基板上的 II 型 Ge クラスレート膜試料の写真画像、(b) II 型 Ge クラスレート膜の XRD パターン (c) ラマンスペクトル。

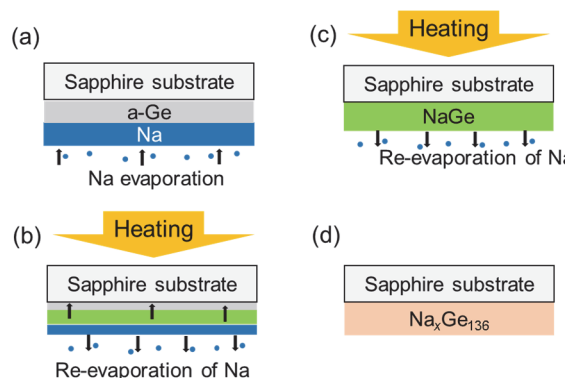


図 11. 予測される膜成長プロセス: (a) a-Ge 膜への Na の真空堆積、(b) IR ランプ加熱中の試料表面からの Na の再蒸発を伴う NaGe 相形成の開始、(c) NaGe 相形成および Na のさらなる再蒸発、(d) 構造 II 型 Ge クラスレートの形成。

- [6] IEEE J. Photovoltaics **3**, 1305 (2013).
- [7] J. Am. Chem. Soc. **129**, 5348 (2007).
- [8] J. Mater. Chem. C **2**, 3231 (2014).
- [9] IEEE J. Photovoltaics **4**, 3 (2013).
- [10] J. Mater. Chem. **18**, 842 (2008).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10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 Yamaga Mitsuo, Kishita Takumi, Goto Kouhei, Sunaba Shogo, Kume Tetsuji, Ban Takayuki, Himeno Roto, Ohashi Fumitaka, Nonomura Shuichi	4. 巻 140
2. 論文標題 Electron spin resonance, dynamic Jahn-Teller effect, and electric transport mechanism in Na-doped type II silicon clathrates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics and Chemistry of Solids	6. 最初と最後の頁 109358 ~ 109358
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jpcs.2020.109358	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 Kumar R., Maeda T., Hazama Y., Ohashi F., Jha H. S., Kume T.	4. 巻 59
2. 論文標題 Growth of Ge clathrate on sapphire and optical properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SFFC05 ~ SFFC05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab6e0a	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 Imai Motoharu	4. 巻 59
2. 論文標題 Semiconducting ternary Si clathrates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SF0804 ~ SF0804
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab69e1	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 今井基晴, 久米徹二	4. 巻 53
2. 論文標題 半導体Siクラスレート	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 固体物理	6. 最初と最後の頁 17-30
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 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 Kume Tetsuji, Ohashi Fumitaka, Nonomura Shuichi	4. 巻 56
2. 論文標題 Group IV clathrates for photovoltaic applications	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 05DA05 ~ 05DA05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.05DA05	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 Kim Duck Young, Kume Tetsuji	4. 巻 56
2. 論文標題 Si allotropes and group IV clathrates investigated under high pressures	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 05FA07 ~ 05FA07
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.05FA07	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 Udono Haruhiko, Imai Motoharu, Kojima Shuhei, Kume Tetsuji, Tanigaki Katsumi, Tajima Hiroyuki	4. 巻 121
2. 論文標題 Optical transmittance and reflectance studies and evidence of weak electron-phonon interaction in Type-I Ge clathrate Ba8Ga16Ge30	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 175105 ~ 175105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4983076	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 Tanaka K., Kumar R., Maeda T., Ohashi F., Jha H. S., Kume T.	4. 巻 8
2. 論文標題 Growth of Si Clathrate Films with Various Annealing Conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics: Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11101/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAPCP.8.011101	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 Hisamatsu H., Yamada K., Ohashi F., Jha H. S., Kume T.	4. 巻 8
2. 論文標題 Preparation of Guest Free Type II Si?Ge Clathrate Using Ionic Liquid Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics: Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11102/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAPCP.8.011102	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 Iwasa H., Ikemoto S., Ohashi F., Jha H. S., Kume T.	4. 巻 8
2. 論文標題 X-Ray Diffraction Investigation of Lithium Silicides under High Pressure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics: Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 11302/1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAPCP.8.011302	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38件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 R. Kumar, T. Maeda, Y. Hazama, F. Ohashi, H. S. Jha, T. Kume
2. 発表標題 Growth of Ge Clathrate on Sapphire and Optical Properties
3. 学会等名 APAC Silicide 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. IMAI
2. 発表標題 Semiconducting Ternary Si Clathrates.
3. 学会等名 APAC Silicide 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Hisamatsu, K. Yamada, F. Ohashi, H. S. Jha, and T. Kume
2 . 発表標題 Structural analysis of guest free type II Si-Ge clathrate,
3 . 学会等名 APAC Silicide 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Iwasa, S. Ikemoto, F. Ohashi, H. S. Jha, and T. Kume
2 . 発表標題 XRD investigation of lithium silicide under high pressure
3 . 学会等名 APAC Silicide 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Tanahashi, Y. Hazama, F. Ohashi, H. Shekher Jha, and T. Kume
2 . 発表標題 Electronic properties of Na doped type II Ge clathrate film grown on sapphire substrate,
3 . 学会等名 APAC Silicide 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Tanaka, R. Kumar, T. Maeda, F. Ohashi, H. S. Jha, and T. Kume
2 . 発表標題 Growth of Si Clathrate Films with Various Annealing Conditions,
3 . 学会等名 APAC Silicide 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Kumar, T. Maeda, R. Tanahashi, Y. Hazama, F. Ohashi, H. S. Jha, T. Kume
2. 発表標題 Optical and Electrical Characterizations of Ge Type II Clathrate Films Grown on Sapphire Substrate
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩砂皓之、野村京平、Jha Himanshu Shekhar、大橋史隆、久米徹二
2. 発表標題 放射光粉末XRD測定によるリチウムシリサイド化合物の高圧物性
3. 学会等名 第60回高圧討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久米徹二、大橋史隆、Jha Himanshu Shekhar
2. 発表標題 IV族系II型半導体クラスレートの研究開発
3. 学会等名 第32回シリサイド系半導体研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩砂皓之、野村京平、Himanshu S. Jha、大橋史隆、久米徹二
2. 発表標題 Li-Si系化合物の高圧XRD測定
3. 学会等名 第59回高圧討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久米徹二
2. 発表標題 II型VI族半導体クラスレートの研究開発
3. 学会等名 第8回次世代太陽電池用新材料研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田 拓磨, ヒマンシュ S ジャ, 大橋 史隆, 久米 徹二, 野々村 修一
2. 発表標題 Na内包II型Geクラスレート膜の光透過スペクトル評価
3. 学会等名 第8回次世代太陽電池用新材料研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩砂皓之, 野村京平, Himanshu S. Jha, 久米徹二
2. 発表標題 リチウムシリサイド系化合物の作製と高圧物性
3. 学会等名 第8回次世代太陽電池用新材料研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 邦彦, Himanshu S. Jha, 久米 徹二, 大橋 史隆
2. 発表標題 ゲストフリーSiGe合金クラスレートの合成
3. 学会等名 第8回次世代太陽電池用新材料研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神戸 慎也, 久米 徹二, Himanshu S. Jha, 大橋 史隆
2. 発表標題 グラスレート作製のための小型真空蒸着装置の構築
3. 学会等名 第8回次世代太陽電池用新材料研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 富士岡 友也, 浅野 友紀, 大橋 史隆, 久米 徹二, ヒマンシュ シャカール ジャ, 野々村 修一
2. 発表標題 電界印加によるII型Geグラスレート膜の合成およびNa除
3. 学会等名 第8回次世代太陽電池用新材料研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久松 大峰, 山田 邦彦, Himanshu S. Jha, 大橋 史隆, 久米 徹二
2. 発表標題 II型SiGeグラスレートの合成と構造評価
3. 学会等名 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 岩砂皓之, 野村京平, Himanshu S. Jha, 久米徹二
2. 発表標題 Li-Si系化合物の合成と高圧物性
3. 学会等名 第18回シリサイド系半導体・夏の学校
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 邦彦, Himanshu S. Jha, 久米 徹二, 大橋 史隆
2. 発表標題 II型SiGeクラスレートの作製
3. 学会等名 第18回シリサイド系半導体・夏の学校
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神戸 慎也, 久米 徹二, Himanshu S. Jha, 大橋 史隆
2. 発表標題 クラスレート作製のための小型蒸着装置の構築
3. 学会等名 第18回シリサイド系半導体・夏の学校
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田 拓磨, ヒマンシュ S ジャ, 大橋 史隆, 久米 徹二, 野々村 修一
2. 発表標題 Geクラスレート薄膜の光吸収スペクトル
3. 学会等名 第18回シリサイド系半導体・夏の学校
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 "富士岡 友也, ヒマンシュ シャカール ジャ, 大橋 史隆, 久米 徹二, 野々村 修一"
2. 発表標題 II型Siクラスレートの金属との接合特性
3. 学会等名 第18回シリサイド系半導体・夏の学校
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田 拓磨、ジャ ヒマンシュ、大橋 史隆、久米 徹二、野々村 修一
2. 発表標題 紫外から赤外領域におけるII型Geクラスレート膜の光吸収スペクトル
3. 学会等名 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 今井 基晴, 鶴殿 治彦.
2. 発表標題 "Gaフラックスを用いたK8Ga8Si38単結晶の育成 次世代太陽電池用新材料研究会"
3. 学会等名 第8回次世代太陽電池用新材料研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田 邦彦, 木野 拓也, Himanshu S. Jha, 久米 徹二
2. 発表標題 ゲストフリーSiGeクラスレートの合成
3. 学会等名 第78回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木 渉太, 久米 徹二, 境 健太郎, Himanshu S. Jha, 大橋 史隆, 野々村 修一, 福山敦彦
2. 発表標題 ゲストフリー 型Geクラスレート膜の合成
3. 学会等名 第78回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 浅野友紀, 浦野和俊, 大橋 史隆, 久米 徹二, 伴 隆幸, 野々村 修一
2. 発表標題 II型Siクラスレート膜の表面自然酸化過程
3. 学会等名 第78回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤 榛悟, 浅野 友紀, 阪上 真史, 浦野 和俊, 富士岡 友也, 大橋 史隆, 久米 徹二, 伴 隆幸, 野々村 修一
2. 発表標題 NaxSi136膜のデバイス化に向けた表面酸化膜の形成過程と金属電極との接合特性の評価
3. 学会等名 第14回 「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Nanto Sugii, Fumitaka Ohashi, Tetsuji Kume, Himanshu S. Jha, Tetsuya Mukai, Hideya Makino, Kansei Suzuki, Shuichi Nonomura
2. 発表標題 Growth of Type II Germanium Clathrate on Sapphire Substrates
3. 学会等名 27th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 鈴木 渉太, H. S. Jha, 大橋史隆, 久米徹二
2. 発表標題 Ge基板上に作製した膜状ゲストフリーGeクラスレート
3. 学会等名 第17回シリサイド系半導体 夏の学校
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田邦彦, H. S. Jha, 大橋史隆, 久米徹二
2. 発表標題 イオン液体を用いたII型SiGe合金クラスレートの合成
3. 学会等名 第17回シリサイド系半導体 夏の学校
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野村京平, H. S. Jha, 久米徹二
2. 発表標題 Li-Si系化合物の作製およびその高圧ラマン測定
3. 学会等名 第17回シリサイド系半導体 夏の学校
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. S. Jha, N. Sugii, F. Ohashi, T. Kume, T. Mukai, T. Ban, S. Nonomura
2. 発表標題 Growth of Type II Germanium Clathrate NaxGe_{136} Thin Films on Sapphire Substrates
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Rahul Kumar, Y. Hazama, F. Ohashi, H.S. Jha, T. Kume
2. 発表標題 A new synthesis technique for type-II Ge clathrate films
3. 学会等名 第68回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tun Naign Aye, Rahul Kumar, Himanshu S. Jha, Fumitaka Ohashi, Tetsuji Kume
2. 発表標題 Synthesis of ternary type II clathrate films using AlGe alloy
3. 学会等名 第68回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池本 彰吾, 杉浦 優太郎, ヒマンシュ S ジャ, 大橋 史隆, 久米 徹二
2. 発表標題 新規三元系化合物 $\text{LiSi}_{1-x}\text{Ge}_x$ の合成
3. 学会等名 第17回 「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rahul Kumar, 大橋 史隆, 山田 航平, Himanshu S. Jha, 久米 徹二
2. 発表標題 Na内包II型Geクラスレート膜の新規合成方法
3. 学会等名 第17回 「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tun Naign Aye, Rahul Kumar, Himanshu S. Jha, Fumitaka Ohashi, Tetsuji Kume
2. 発表標題 Synthesis of type II clathrate film using AlGe alloy
3. 学会等名 第17回 「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム
4. 発表年 2020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
研究分担者	福山 敦彦 (Fukuyama Atsuhiko) (10264368)	宮崎大学・工学部・教授 (17601)	
研究分担者	鶴殿 治彦 (Udono Haruhiko) (10282279)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・教授 (12101)	
研究分担者	大橋 史隆 (Ohashi Fumitaka) (20613087)	岐阜大学・工学部・助教 (13701)	
研究分担者	今井 基晴 (Imai Motoharu) (90354159)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・上席研究員 (82108)	

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