

実用相変化記録材料の放射光構造解析

Synchrotron X-ray Structural Analyses of Phase-Change Recording Materials Used in Practical Applications

松 永 利 之
Toshiyuki Matsunaga

塚 本 義 朗
Yoshiaki Tsukamoto

井 垣 恵 美 子
Emiko Igaki

児 島 理 恵
Rie Kojima

山 田 昇
Noboru Yamada

要 旨

現行の相変化メモリーは、ナノ秒を切る高速な記録書き換えが行えると同時に、いったん書いた記録は百年にも及ぶ安定保持が可能であり、さらに数十万回、数百万回の繰り返し書き換えも行える。放射光を用いた解析は、これら材料のアモルファス相の構造が、十分に強い共有結合性を有しており、それが長時間記録保持性に参与していること、そして一方では、結晶相の構造が、アモルファスの構造と酷似しており、両相の間が、原子結合のわずかのつなぎ換えで、高速な相転移が可能であることを明らかにした。

Abstract

Synchrotron X-ray analyses reveal that, in phase change materials for practical use, atomic clusters formed by strong covalent bonds in the amorphous states provide them with high endurance, and on the other hand, high similarity in atomic configuration between their amorphous and crystalline states gives extremely high-speed phase change by slight bond interchanges. These small atomic shifts restrain long-range atomic diffusion, which secures high cyclabilities for these materials.

1. はじめに

周知のとおり、メモリーは、CPUやハードディスクと並んで、コンピューターの3大パーツと呼ばれ、それだけ重要な役割をもっており、携帯電話、スマートフォンなど、さまざまな電化製品の性能に大きな影響を与えている。ただ、現在これらメモリーを支えているDRAM (Dynamic Random Access Memory) やNANDフラッシュメモリー (NAND-type Flash Memory) は、記憶容量に限界を迎えており、それらを置き換える新しい不揮発性メモリーとして、「PCRAM (Phase-Change RAM: 相変化固体メモリー)」、 「STT-RAM (Spin-Transfer Torque RAM: スピン注入メモリー)」、 「ReRAM (Resistance RAM: 抵抗変化メモリー)」に期待が集まっている。それぞれに長所短所があり、スピン注入メモリーが高性能・高信頼性、抵抗変化メモリーが高密度、相変化メモリーが両者の中間の位置づけとなっている。これら新メモリーの中で、相変化メモリーは、光ディスクの開発を通して材料がよく研究されており[1]-[6]、現行の材料では、ナノ秒を切る高速な記録書き換えが行えると同時に、いったん書いた記録は百年にも及ぶ記録の安定保持、さらには、数十万回から数百万回 ($10^5 \sim 10^6$ 回) 以上の書き換えが可能で、 $10^{12} \sim 10^{13}$ 回にも及ぶ書き換えの成功例も報告されている[1], [4]。本稿では放射光を用い明らかにされた相変化材料のアモルファス相、結晶相の構造 (原子配列、化学結合) と記録メカニズムとの関係

を紹介する。本稿に記す原子レベルでの解析が、今後、PCRAMはもとより、同じく構造 (結合) 変化を用いた ReRAM, そして結晶やアモルファスを用いた、さまざまな材料、デバイスの開発に役立つものと期待される。

固体物質は、結晶であれ、アモルファスであれ、それらは原子の集合体であり、それらの配列 (構造) には、何らかの秩序性がみられる。前者は単位胞で規定された基本単位の無限の周期性がみられ、一方、後者は、長距離の秩序性は待たないが、短距離、中距離の秩序を有す。これら物質にX線を照射すると、それぞれの構造に特有の回折、吸収、光電子パターン (信号) が得られ、逆に得られた信号を詳細に解析することにより、現在では、アモルファスの構造でさえ、EXAFS (Extended X-ray Absorption Fine Structure: X線吸収微細構造) 法、RMC (Reverse Monte Carlo: 逆モンテカルロ) 法などにより解析可能となっている。本稿での解析結果は、主に放射光施設を利用した実験、さらには計算機シミュレーションも併用し得たものである (例えば文献[6]参照)。

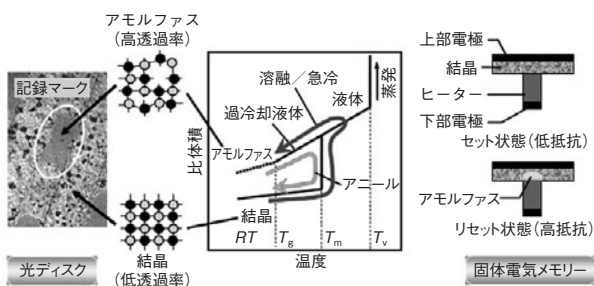
2. 相変化記録の原理と実用材料

今日の相変化記録メディアを支えている代表的な材料は、Ge-Sb-Te三元系の中から見いだされた。1つは、GSTと呼称されるGeTe-Sb₂Te₃擬二元系化合物[7]であり、もう1つは主成分がSb-Te二元系で、それらにGeや、Ag, Inなどを少量添加した化合物である[8]。後者の代表的な

化合物は、Ag-In-Sb-Te四元系化合物であり、AISTと呼ばれる。

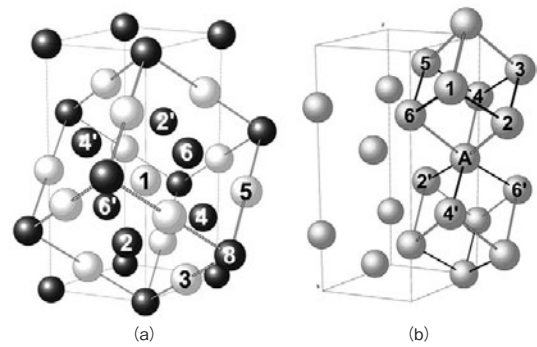
相変化記録デバイスは、DVD-RAM (Digital Versatile Disk-Random Access Memory) やブルーレイディスク (Blu-ray Disc : BD) に代表される書き換え型の光記録メディアがなじみ深いと思われる。それらにおいては、物質のアモルファス-結晶間の可逆的な相変化に伴う光学特性の変化を利用して情報の蓄積が行われている。一方で固体電気メモリー (以下、電気メモリーと記す) は、相変化に伴う物質の電気抵抗変化が利用される[1]-[5]。アモルファス相は、レーザー照射や通電加熱によって物質を加熱、溶融し、急冷することによって得られる (第1図参照)。原子は、この極短時間の急激な冷却過程において、物質内のあちこちで局所的に集合して無数の分子を作り、それらが無秩序に配列して、アモルファス構造を形成する。現行の相変化材料のアモルファス相は、室温では十分に安定であり、常温では「数十年~百年余りも安定に保持」することができる[9]。一方、結晶相は、アモルファス形成時に比べ、より緩やかな光照射や通電加熱により、アモルファス相を溶融することなくアニールし、原子配列に三次元周期性を与えることによって得られる。(a) GST系ではNaCl型[10]の準安定相に、一方、(b) Sb-Te系ではA7型構造[10]に結晶化する (第2図)。(a) : GeとSbは、ランダムに○位置を、一方Teは●位置を占有している。六方晶表示では、6層構造となる。(b) 複数の構成元素は、いずれの原子サイトもランダムに占有している)。光ディスク、電気メモリーにおいては、このような結晶化を数10 nsの「極短時間で完了」させることが可能で、アモルファス相の保持時間との時間差は、実に 10^{17-18} 倍にも及ぶ。この性質がゆえに、相変化記録デバイスは、優秀な揮発性メモリーであるとともに、高速書き換えも可能となっている。記録の高密度化はレーザー光を絞ることにより、また電気メモリーでは記録素子を微細加工することにより実現している。

これら材料のアモルファス相、準安定結晶相には、平



第1図 相変化記録概略図

Fig. 1 Schematic drawing of phase-change recording

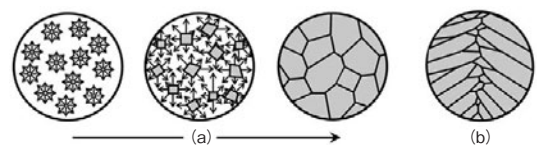


第2図 (a) GST-NaCl型, (b) AIST-A7型結晶構造

Fig. 2 Structure models for (a) GST-NaCl-type and (b) AIST-A7-type crystals

均の最外殻p電子数が、3内外の値をとるといふ、共通した特徴がみられる。このため、両相の構造は、 x, y, z 方向に伸びたp電子が隣の原子との結合の主役となり、p電子結合による六配位構造 (八面体配位構造) が、それらの原子配列の基本となる (結晶では、例えば第2図にみられるように、GSTの原子1, AISTの原子Aは、 $2-1-2'$ 、 $4-1-4'$ 、 $6-1-6'$ 、あるいは、 $2-A-2'$ 、 $4-A-4'$ 、 $6-A-6'$ と、6つの原子で囲まれている)。アモルファスから結晶への構造変化は、主にこれらp電子 (結合手) のつなぎ変えによって生じる。これら化合物の価電子帯を占有する電子の密度が高く、光との相互作用が大きい。このことも、レーザー照射による瞬間的な昇温を可能にしている一因である。

このように、両者は多くの共通点をもっているが、第3図 (第1図のアモルファス記録マークを大円で示す。円の外側は、結晶である) に示すように、それらの高速結晶化過程は著しく異なっている。前者は、アモルファス中に無数の結晶核、すなわち結晶構造と同じ原子配列をもった原子鎖、原子環、原子団が潜んでいて、それらが起点となって、ビット全体が一斉に結晶に変化する (結晶核生成高速結晶化メカニズム)。一方、後者は、アモルファス中で原子結合の連鎖的な組み換えが起こり、バラバラだったクラスター (分子) の配向軸が雪崩的に一



第3図 相変化過程略図。陰付部は結晶を表す。(a) : GST および (b) : AIST

Fig. 3 Schematic drawing of crystal growths for two typical phase-change materials, (a) GST and (b) AIST

瞬で整列して、アモルファスビットの周辺結晶部からビットの中央部に向かって結晶成長が瞬時に進行する（高速結晶成長メカニズム）。

3. 相変化記録材料の構造と相変化メカニズム

これら2つの材料のアモルファス相の原子配列は、クラスター（分子）における原子の並び方、あるいは配位原子などの観点から、それぞれ、NaCl型、A7型結晶の原子配列とよく似ている。ただ、いずれの結晶も等距離6配位で近似しうる配位構造をもっているのに対し、アモルファスの方は、Ge, Sb, Te原子が、6個の配位原子の内、8-N則に従って、4, 3, 2個の近距離原子とより強く結合し、それら原子の配位数は、順に、近似的に、4, 3, 2となっている（ただし、後述のように、Teは3のものも含まれる[6]）。

ただ、これら2つの材料の原子配列の決定的な相違は、結晶、アモルファスを問わず、GSTでは同種原子同士が隣合うことを避けているのに対し、AISTでは同種原子（Sb）で原子鎖を作っていることにある。いずれにしても、このような構造の類似性から、言い換えれば、これら化合物が、アモルファスと類似した結晶相（準安定相）をもつからこそ、アモルファスから結晶への構造変化は、原子の拡散を伴うことなく、原子間結合の組み換えと、それによるわずかな原子変位のみで高速に完了するのである。

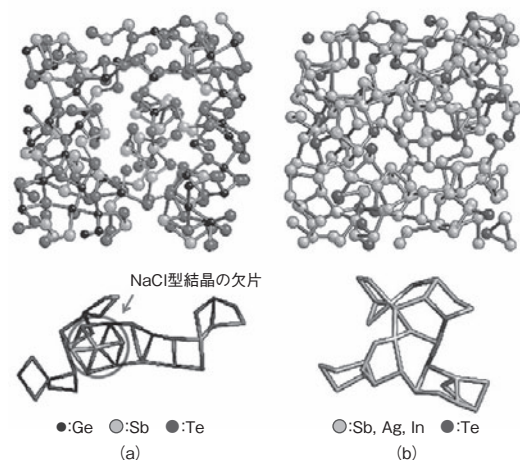
3.1 GeTe- Sb₂Te₃擬二元系化合物

GST擬二元アモルファス薄膜は、瞬間的なレーザー照射や通電加熱（のアニール）により、GeTeからSb₂Te₃-67%辺りまで、NaCl型構造（第2図（a）参照）に単一相として結晶化させることができる[11]。しかもこれらのNaCl型構造は、平均的には立方構造であるが、とりわけ、Naサイトを占有しているGe, Sbは、近くに3つ、遠くに3つのTe原子を有した3+3配位構造を形成しながら、ランダムに、平衡位置からずれていると考えられている[12], [13]。これら3つのこと、①単一相に結晶化すること、②空間的に等方的な立方晶に結晶化すること、および③3+3配位構造をもって乱れていることが、記録の消去において、原子のわずかの移動で、高速に、アモルファス相から結晶相に、構造変化可能であることを示唆している（①二相への分離、②異方性の強い結晶への構造変化は、大きな原子移動を伴うであろう。③3+3配位構造は、次章のAISTの高速相変化メカニズムと共通しており、上でも述べたように、原子結合のつなぎ変えのみによる、高速結晶成長に寄与する項である）。いうまでも

ないことであるが、このNaCl結晶中では、どのような結合経路をたどって行っても、同種原子対が存在しない。Teの隣はGe(Sb)、Ge(Sb)の隣は、常にTeである [例えば、第2図（a）の1から始めて、最短の1-2-3-4-1（4員環）とたどっても、あるいは4が原子空孔の場合、もっと長い原子鎖、1-2-3-8-5-6-1（6員環）とたどっても、異種原子が隣り合っている]。実はこの構造的な特徴が、アモルファス中にも潜んでいる。

GST系擬二元系アモルファス化合物は、放射光高エネルギー X線回折実験に基づいた逆モンテカルロシミュレーション（既出のRMC法）、大規模密度汎関数（Density Functional theory: DF）- 分子動力学（Molecular Dynamics: MD）シミュレーションを用いた解析においても、アモルファスの構造を形成しているのは、結晶と同様、主に、Ge-TeとSb-Teの2種類の原子対であることが確認されている（第4図（a）参照）。しかも、原子環の分布をみても、このアモルファス構造中には、4員環（第4図（a）の下の部分拡大図、結晶性の立方体すら存在する）が、そして6員環も、目立って多い[14]。一方、第2図で示したNaCl結晶構造モデルにみられるように、結晶は、ほぼ4員環、6員環のみで組み立てられている。このように、アモルファスの原子配列は結晶のそれによく似ている。ゆえに結晶周期をもたないそのアモルファスの原子鎖に、Ge, Sb, Teの原子を置き換えることなく、結合のつなぎ変えによるわずかな原子シフトのみで三次元の繰り返し周期を与え、NaCl型構造を得ることができると考えられるのである。

アモルファス中の三種の原子は、8-N則にほぼ従って最近接原子と結合し分子を形成している。ただ、結晶と



第4図 (a) : GST および (b) : AISTのアモルファス構造

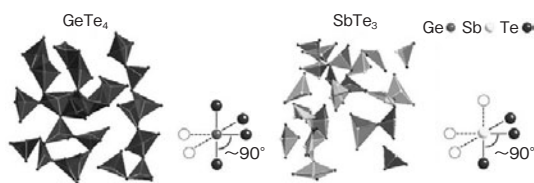
Fig. 4 Atomic configurations for (a) GST and (b) AIST amorphous materials

比べ、それら配位原子との原子間距離が縮んで、より共有結合性を増している。これは、熔融状態からの急冷過程において、極めて短い時間で、まず結合エネルギーの高い（平たく言えば仲の良い）原子同士、Ge-TeとSb-Teがとっさに結び付いてGeTe₄やSbTe₃などの分子を形成する（第5図参照）。そしてそれら分子同士は、頂点、稜（りょう）を介し、結合角に分布をもって、緩く結合し、第4図（a）に示すところのアモルファスの構造を作り上げた結果と解釈できる[14], [15]。

このアモルファス構造を構成している個々の分子は思いのほか安定で、常温では数十年もその相を安定に保つことができる。上では述べなかったが、アモルファス中には、Ge-Te、Sb-Teのほか、Ge-Geの等極結合も少なからず存在する。これら等極結合も、アモルファスの安定性、すなわち粘性の向上に寄与しているものと思われる。Ge-Geは、ご承知のとおり、この元素が作るダイヤモンド構造中にもみられるように、非常に強い共有結合原子対である。

しかしながら、この安定したアモルファスも、400℃～500℃まで昇温すると、結晶への転移速度が一挙に10¹⁷⁻¹⁸倍に跳ね上がる。そしてNaCl型の結晶原子配列をもった原子鎖、原子環、原子団（クラスター）が最初の結晶核となって、Ge-Geなどの等極結合を切断しつつ、それらの周りのアモルファス部を10数nsで結晶化させることが可能となる（第3図（a）参照）。

アモルファス中の原子の平均配位数は、ほぼ3である（先に述べたように、Ge、Sbの配位数は、～4および～3であるが、Teのみ、2配位のもの3配位のもので、ほぼ同数存在し、～2.5となっている。これらにより、GSTアモルファス化合物の平均配位数は擬二元組成によらず、3となっている）。結晶では、上でも述べたが、等距離6配位で近似できる3+3配位構造である。この両者の配位構造の類似性から、結晶核の周りのアモルファス部は、次章のSb化合物の高速相変化と類似した、結合交換型の高速結晶成長によって、記録マーク全体の結晶化が完了すると考えることができるのである。このよう



第5図 アモルファスGe₂Sb₂Te₅中に見いだせる、結合角が90°近辺のGeTe₄とSbTe₃多面体

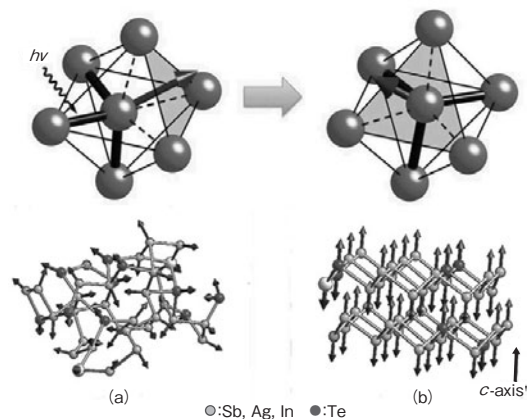
Fig. 5 GeTe₄ and SbTe₃ polyhedra with bond angle of ~90°, found in amorphous Ge₂Sb₂Te₅

に、GSTのアモルファスマークは無数の結晶核からほぼ同時に結晶成長が生ずる。そのため、マークは、結晶化により、ランダムな結晶方位をもった、平均粒径、10 nm～20 nm程度の微結晶で埋め尽くされた組織を呈することとなる（第3図（a）参照）。

3.2 Sbベース多元系化合物

この節では、GST材とともに、もう一つの実用高速相変化材料であるAIST[8]について述べる。AISTのベース材料であるSb-Te二元系（例えば、AIST材料の代表的な組成の一つであるAg_{3.5}In_{3.8}Sb_{75.0}Te_{17.7}の母材はSb₈₉Te₁₁である）の結晶は、非常に複雑な長周期構造をとる[16]。ところが、AISTにおいては、Ag、Inの添加により、構造が単純化し、Sb（As、Bi、および高圧下のP）と同じ、6層のA7型構造をとる（第2図（b））。四種の元素は、ランダムに原子サイトを占有している。先に述べたGSTのNaCl構造も6層構造であった。この種の構造においては、原子配列がJahn-Teller 歪（ひずみ）[17]を生じることによって電子構造の安定化が図られていることが知られている。そのため、いずれの原子も、（少し）近くに3つ、（少し）遠くに3つの近接原子を有した、3+3配位構造を形成する（第2図（b）中の、黒い太実線と灰色の太実線／先に述べたように、GSTのNaCl型構造においても、3+3配位構造をもっていた）。

AIST結晶（A7型構造）においては、3つの最近接原子から中心原子までベクトルを引いたとき、それらの合力ベクトルは、すべて、第6図（b）下に示すように、x-y平面に垂直（c_H軸に平行）となる。一方で、後にも述べるが、実はAISTのアモルファス構造は、3+3配位構造を保ったまま、これらの合力ベクトルがランダムな方向を



第6図 AISTの（a）アモルファスと（b）結晶の構造

Fig. 6 Atomic configurations in (a) AIST amorphous and (b) crystalline materials

向いているだけ、と考えることができる[6] (第6図 (a) 下参照)。そして、アモルファスから結晶への構造相転移は、このベクトルが、同じ方向にそろってゆく過程である、ととらえることができるのである。

放射光施設による実験と、スーパーコンピューターを利用したDF-MDシミュレーションとを併用し、詳細な解析の末得られたアモルファスAISTの構造を第4図 (b) および第6図 (a) に示す。GSTのアモルファス相には、4員環と6員環が多く存在し、これら結晶性の原子環が結晶核となり得た。しかしながらAISTの方には、さまざまなリングが存在するなか、結晶性の4員環、6員環が突出して多いという分布はみられなかった[6]。これは、AISTの高速結晶化が、GSTとは異なる、別のメカニズムで生じていることを示唆している。一方、結晶の方は、GSTと同様、第2図 (b) にみられる、1-6-A-2、1-2-3-4-5-6-1などの、4員環、6員環のみによって構成されていた。そして詳細な解析の結果、AISTのアモルファスの構造には、主成分であるSbが、その結晶と同じく、3+3の配位構造をもっているという、結晶との共通点が見いだされたのである (第6図 (a) - (b) 参照) [6]。ただし、近くの3つとは原子間距離がより短く、言い換えればより強く共有結合して、一方、遠くの3つとは原子間距離がより長くなっている。これが、近くの3つの配位原子のみが注目され、アモルファス中のSbは (8-N則が教えるところの) 3配位構造をとっている、と言われるゆえんである。

ただ、これら強固に共有結合した3配位の構造ユニット同士はフレキシブルにつながれているため、合力ベクトルは、ランダムな方向を向いている (再び第6図 (a) 参照)。これが、配位構造は結晶と似ているものの、原子配列に結晶のような周期性をもっていない理由である。3つの短距離結合で形成された四面体構造ユニット (分子、第6図 (a) 上で、中心原子と、太線でつながれた3つの配位原子) は比較的安定であり、このアモルファスも、GSTのそれと同様、室温で数十年は安定に保つことができる。

ただ、このアモルファス物質に強い光を照射すると、その光エネルギーと二次的な熱エネルギーにより、短い結合と長い結合の交換 (スイッチ) が生じる (第6図 (a) の上、左右の図参照)。この結合の交換に伴うわずかな原子移動により、隣り合った合力ベクトルの方向を、最初は近似的にはあるにせよ、よりそろったものに変化させることができる。そして、また同じメカニズムにて、そのまた隣のベクトルをそろえることができる。これが結晶との界面からアモルファス記録マークの中心に向かって、順次、ベクトルの整列が進行してゆく理由であ

る。同時に、配位ベクトルは、光照射によって生じた熱、すなわちアニーリングの効果により、より平行度を増してゆくであろう。そして、記録ビット全体が結晶相に変化する。この変化が、わずか数十ナノ秒で生じるのである。

相変化光記録ディスクにおいて、アモルファス記録マークの周囲は結晶である (第1図参照)。レーザー照射によって、高速結晶成長が、この結晶-アモルファス界面 (ドメインウォール) からマークの中心に向かって進行する。実際の消去 (アモルファスマークの結晶化) は、レーザーがトラックに沿って、すなわちディスクの円周方向に掃引されるので、マーク左右の周辺部から中央部に向かって、針状に結晶化が進み、AISTの場合、GSTの微結晶が集積したモザイク組織とは異なり、針状 (微) 結晶が方向をそろえて中心に向かって成長した組織が観測されることとなる (再び第3図 (b) 参照)。なお、Sb系化合物のアモルファスにおいて、Teなどの添加物は、アモルファスの安定化、結晶化温度の調整、および結晶構造の単純化に大きく寄与している。

4. まとめ

相変化記録は、電荷移動・蓄積、磁気スピン再配列などの他の記録デバイスと比べ、原理上、揮発性において優れていると考えられる。そして、高密度記録についても、本稿で述べたGST、AISTなどのカルコゲナイド合金は、10 nmを切る寸法まで微細化しても、相変化の性質を失わないとされている [18]。このため、DRAMおよびNANDフラッシュメモリーと比べ、微細化しやすい、言い換えれば、高密度化しやすい、あるいは大容量化しやすい。電気メモリーにおいては、微細加工技術のほか、現在は、ナノワイヤーを用いたデバイス作りの研究も行われている。

さらに、最近の著者らの放射光を用いた研究においては、近接場光など的高密度な光を用い、そして適切な冷却速度を設定することにより、ピコ秒オーダーでの書き込み、消去も可能との実験結果を得ている。ナノ秒を切れれば、これは、現行の磁気記録に肩を並べる速さである。また、熔融状態を経ることなく固体の状態を保ったまま原子移動 (原子位置のスイッチ) のみで記録-消去過程を具現化できたならば、エネルギー消費の削減のみならずさらなる高速記録が望めるであろう。現在、GST、AISTを用いて多層薄膜を構成し、それらの層界面で特定の原子に着目し、それらの原子位置を固体状態のまま選択的にスイッチさせて、超高速の繰り返し書き換えを実現しようといった取り組みが正に始まっている [19]。

本稿では、実用相変化材料の、高いデータ保持性と高

速相変化性が、そのアモルファス相、結晶相の原子配列(構造, 結合状態)に大きく依存していることを紹介した。今日では、放射光施設の拡充, 計算技術, 分析技術の発展により、結晶はもとよりアモルファスの構造, さらには、ナノメートルスケールの微小領域や、反応途中段階の構造さえ解析できる。今後、今回の研究成果が、来るべき低炭素社会に適合する次世代の記録メディアをはじめ、多くの材料, そしてデバイスの開発に結び付くことを、心より願うものである。

参考文献

- [1] 奥田昌弘 監修, “次世代光記録技術と材料,” シーエムシー, 東京, 2004.
- [2] M. Wuttig et al., “Phase-change materials for rewriteable data storage,” *Nature Mater.*, 6, 824-832, 2007.
- [3] S. Raoux et al., “Phase change materials,” Springer, New York, 2009.
- [4] 電子情報通信学会「知識ベース」10群-4編-5章, 電子情報通信学会, 2010.
- [5] A. V. Kolobov et al., “Chalcogenides, metastability and phase change phenomena,” Springer, Heidelberg, 2012.
- [6] T. Matsunaga et al., “From local structure to nanosecond recrystallization dynamics in AgInSbTe phase-change materials,” *Nature Mater.*, 10, 129-134, 2011.
- [7] N. Yamada et al., “Rapid phase transitions of GeTe-Sb₂Te₃ pseudobinary amorphous thin films for an optical disk memory,” *J. Appl. Phys.*, 69, 2849-2856, 1991.
- [8] H. Iwasaki et al., “Completely erasable phase change optical disk,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, 31, 461-465, 1992.
- [9] 財団法人 機械システム振興協会, “長期保存のための光ディスク媒体の開発に関するフーズビリティスタディ,” 2006.
- [10] 桐山良一 他, “構造無機化学,” 共立出版, 東京, 1979.
- [11] T. Matsunaga et al., “Single structure widely distributed in a GeTe-Sb₂Te₃ pseudobinary system: A rock salt structure is retained by intrinsically containing an enormous number of vacancies within its crystal,” *Inorg. Chem.*, 45, 2235-2241, 2006.
- [12] T. Matsunaga et al., “The order-disorder transition in GeTe: Views from different length-scales,” *Appl. Phys. Lett.* 99, 231907-3, 2011.
- [13] T. Matsunaga et al., “Structural review of phase-change recording materials for practical use,” *Proceedings of the European Phase Change and Ovonic Symposium (E\PCOS2012)*, 103, 2012. <http://www.epcos.org/library/library2012.htm>, 参照 Mar. 5, 2013.
- [14] S. Kohara et al., “Structural basis for the fast phase change of Ge₂Sb₂Te₅: Ring statistics analogy between the crystal and amorphous states,” *Appl. Phys. Lett.* 89, 020201-3, 2006.
- [15] J. Akola et al., “Experimentally constrained density-functional calculations of the amorphous structure of the prototypical phase-change material Ge₂Sb₂Te₅,” *Phys. Rev. B*, 80, 020201(R)-4, 2009.
- [16] T. Matsunaga et al., “Structural transformation of Sb-based high-speed phase change material,” *Acta Crystallogr. B* 68, 559-570, 2012.
- [17] R. Hoffmann, “Solids and surfaces: A chemist’s view of bonding in extended structures,” VCH, New York, 1988.
- [18] H. Horii et al., “Scalable high performance PRAM for storage class memory,” *Proceedings of the 24th Symposium on Phase Change Oriented Science (PCOS2012)*, 13, 2012.
- [19] J. Tominaga et al., “Theoretical and experimental studies on superlattice Ge₂Sb₂Te₅,” *Proceedings of the European Phase Change and Ovonic Symposium (E\PCOS2009)*, 148, 2009. <http://www.epcos.org/library/library2009.htm>, 参照 Mar. 5, 2013.

執筆者紹介



松永 利之 Toshiyuki Matsunaga
R&D本部 デバイスソリューションセンター
グリーンマテリアル開発室
Green Material Development Office, Device
Solutions Center, R&D Div.
理学博士



塚本 義朗 Yoshiaki Tsukamoto
R&D本部 デバイスソリューションセンター
グリーンマテリアル開発室
Green Material Development Office, Device
Solutions Center, R&D Div.



井垣 恵美子 Emiko Igaki
R&D本部 デバイスソリューションセンター
グリーンマテリアル開発室
Green Material Development Office, Device
Solutions Center, R&D Div.



児島 理恵 Rie Kojima
AVCネットワークス社 ストレージ事業推進室
Storage Business Promotion Office, AVC
Networks Company
工学博士



山田 昇 Noboru Yamada
京都大学大学院 工学研究科材料工学専攻
Department of Materials Science & Engineering,
Kyoto University
工学博士