

超省電カトポロジカルRAM

産業技術総合研究所 ナノエレクトロニクス研究部門

富永淳二



フラッシュメモリから次世代へ

メモリへの要求

不揮発性 (待機電力O)

大容量化 (データセンターの小型化)

低消費電力&高速

低放熱性 (冷却コストの低減)

コスト

次世代メモリに向けた産総研での研究

- ・磁気抵抗変化メモリ
- 相変化メモリ (超格子型)
- ・強誘電性メモリ
- ・抵抗変化メモリ

など

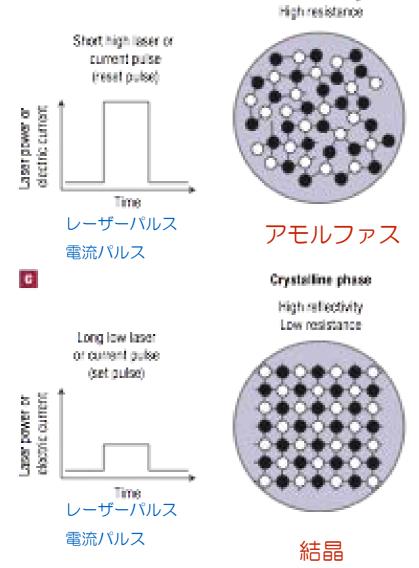


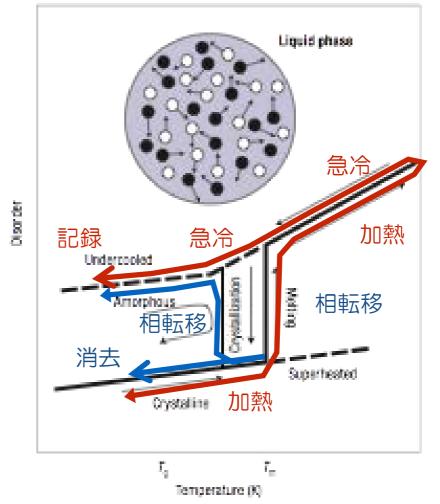
相変化メモリの基本原理

カルコゲン化合物の結晶ーアモルファス相転移

相変化メモリは、すでに記録型光ディスクDVD-RAM, DVD-RW, Blue-rayの記録膜として商品化され、すでに約20年の歴史を持つ。カルコゲン材料、特にGe-Sb-Te三元合金の結晶状態とアモル

ファス状態での大きな光反射率差ががよび三桁にも及ぶ電気抵抗差を利用して、記録消去を行う。



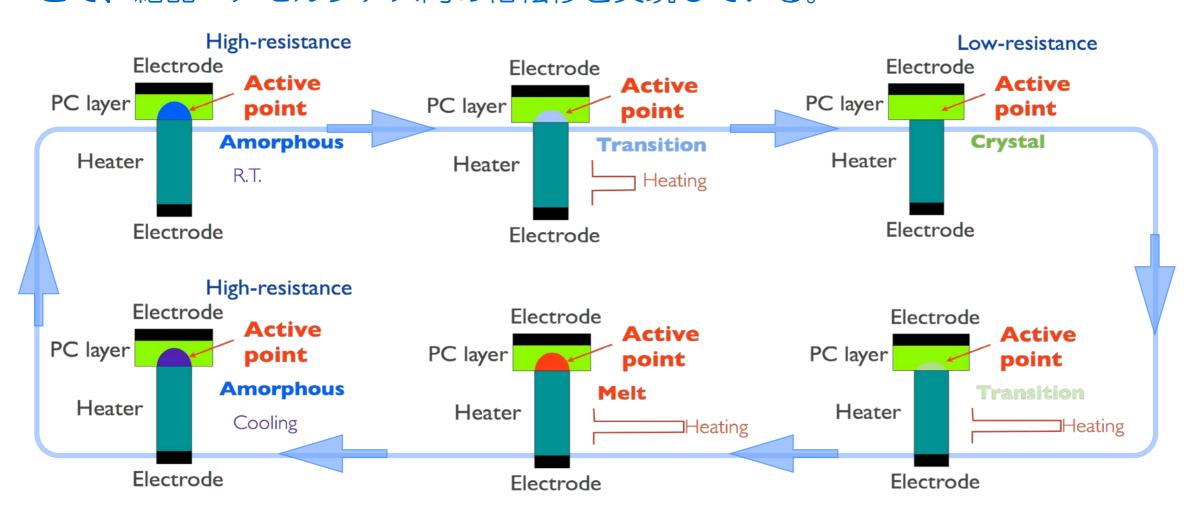


M. Wuttig and N. Yamada, Nat. Mater. **6**. 824-832 (2007)



相変化メモリ(PRAM) デバイスの構造と制御

近年、相変化メモリが不揮発性電気メモリとしても頭角を現し、Intel-Micron連合の 3D-X-point memoryとして採用された。相変化固体メモリは、上下の電極でGe-Sb-Te相変化膜と加熱用ヒーター膜を挟み込み、電流パルスの強度と時間を変化させることで、結晶ーアモルファス間の相転移を実現している。





相変化不揮発性メモリの問題点

Ge-Sb-Te合金薄膜の結晶状態とアモルファス状態の抵抗差をメモリに応用

- 結晶(1kΩ) <> アモルファス(>1MΩ)
- アモルファス形成時に融点まで温度を上げ、急冷固化が必要

このとき電気エネルギーを熱エネルギーに変換し、熱エネルギーで加熱するところが問題!

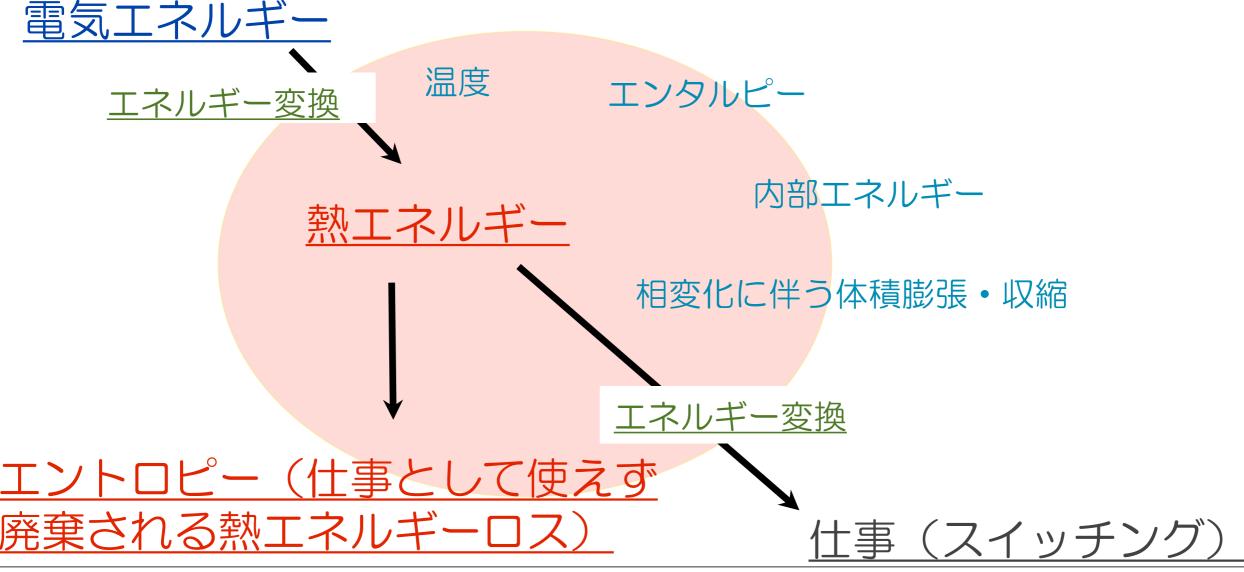
従来技術では、メモリ部の体積を可能な限り小さくしてエネルギーを低減 (エネルギーロス大)



相変化不揮発性メモリの問題点

相変化メモリは、このように電気エネルギーを熱エネルギーに変換して、結晶ーアモルファス間相転移を実行させるので、記録消去問題は熱力学に解決策がある。

一つの方法はスイッチ領域を極限まで小さくさせる、もう一つはエントロピーを減少させて サイクル効率を上げること。

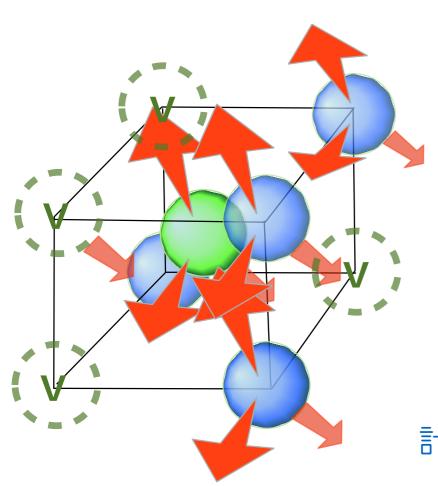




相変化不揮発性メモリの問題点

Ge-Sb-Te合金は20%以上の空孔をもっていることがエントロピーを増大させる

スイッチングで配置関数 **Ω** が空孔の存在によってかなり大きくなる。



エントロピーSは、

$$S = k \cdot ln(\Omega).$$

$$\Omega = N!/n_{Ge}!n_{Sb}! n_{Te}! n_{V}!...$$

TΔS(ランダム空孔配置) >> **TΔS**(空孔なし)

計算すると90%-95%の入力エネルギーが空孔の存在 でエントロピーロスする

入力エネルギーがスイッチ動作にうまく分配されていない



超格子型相変化メモリの提案 (2008)

Ge-Sb-Te合金をGeTe合金薄膜とSb₂Te₃合金薄膜の結晶積層構造とし、かつ各々の薄膜の結晶成長方向を制御。電圧印加に対してGe原子を移動させてメモリ動作をおこなう

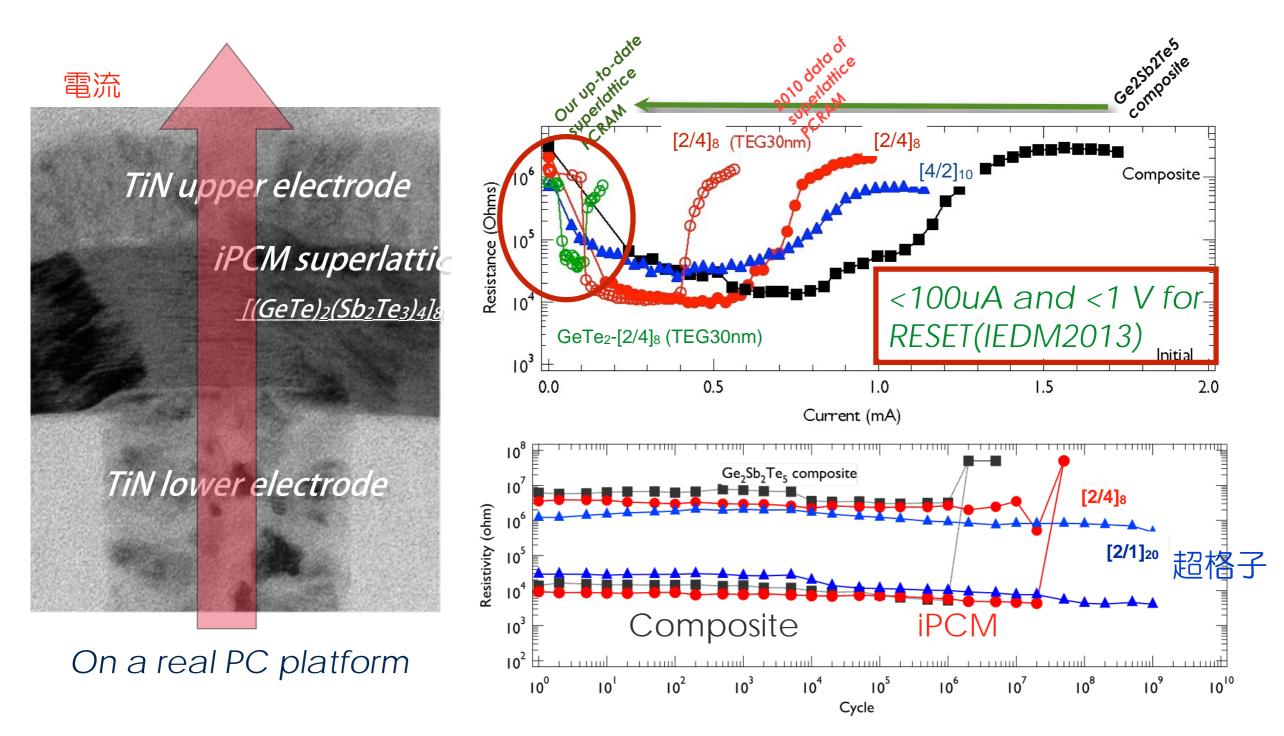
- 結晶1(10kΩ~)
 結晶2(>1MΩ)
- 融解不要

入力エネルギーを熱エネルギーに変換する必要がほとんどなく、 エネルギー損失(エントロピー)が大幅に低減できる!

J. Tominaga et al., Role of Ge Switch in Phase Transition: Approach using Atomically Controlled GeTe/Sb₂Te₃ Superlattice, Jpn, J. Appl. Phys. 47 (2008) 5763-5766.



超格子型相変化メモリのデバイス動作実証



R. Simpson, P. Fons, A. V. Kolobov, T. Fukaya, M. Krbal, T. Yagi and J. Tominaga, Nature Nano, 6, 501 (2011).



超格子型相変化メモリへの期待

超格子型相変化メモリ

・ 産総研が2011年に開発した新型相変化メモリ

特徵

- ・従来型相変化メモリ比で消費電力1/10~1/100
- 高速動作 ~ns (理論的にはps動作可能)
- ・従来型より3桁以上の記録・消去回数の改善(>109)
- ・電子散乱を抑制した動作が理論的には可能、低発熱性
- スピン軌道相互作用を利用した新しいポテンシャル (スピンメモリなど)



超格子型相変化メモリへに期待

超格子相変化メモリ技術の拡散

2011年にNature Nanotechnology に発表後

メモリ技術として

- FIRST、LEAPによる国家プロジェクトのテーマ
- EUによる類似プロジェクトの立ち上げ

トポロジカル絶縁体応用技術として

- JSTのCRESTテーマに採択(2014)
- 内外の学会からの多数の招待講演



IMPULSEにおける超格子型相変化メモリ

低電圧動作トランジスタとリンクした低電圧動作メモリ

(目標:動作電圧~O.3V)

- 1 V以下でのメモリ動作の検証
- ・問題点の洗い出し
- ・高密度化プロセス技術の検討

また次世代光技術分野への応用として

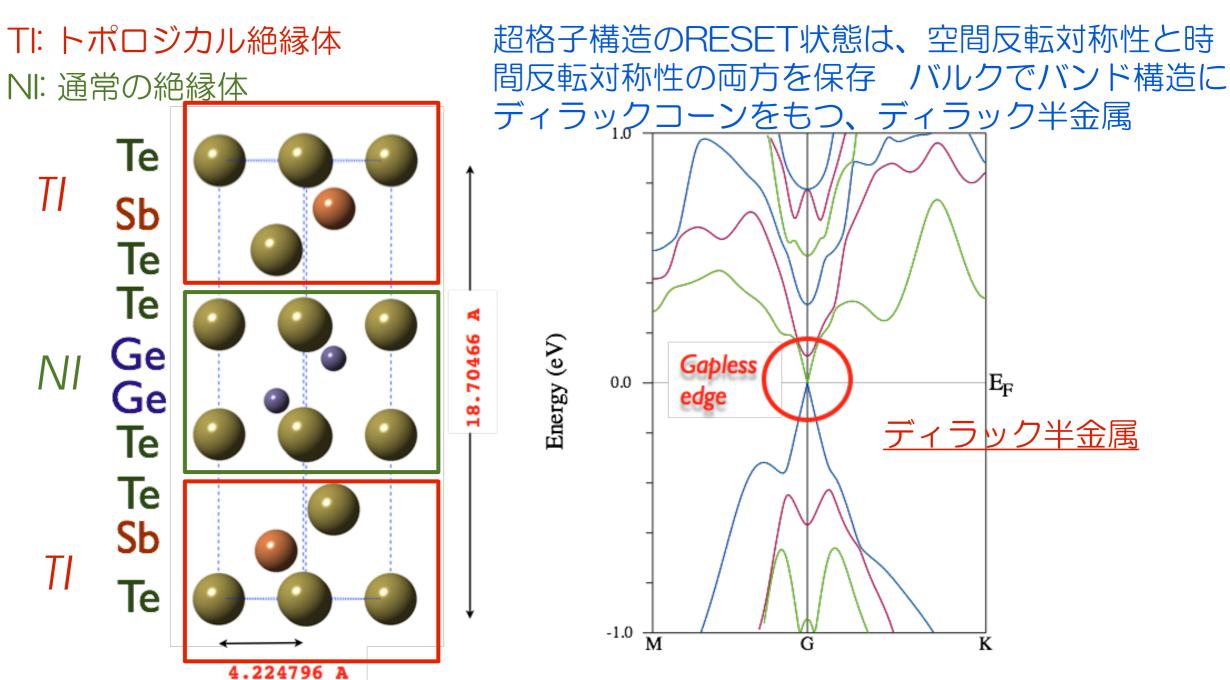
ディラック半金属として、メモリを超えたテラヘルツ送受信機の検

討など



デバイスの特性とトポロジカルとの関連

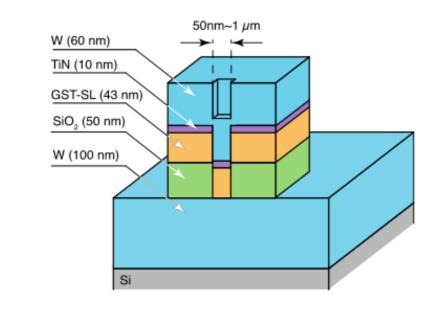
超格子構造とトポロジカル絶縁体との繋がり

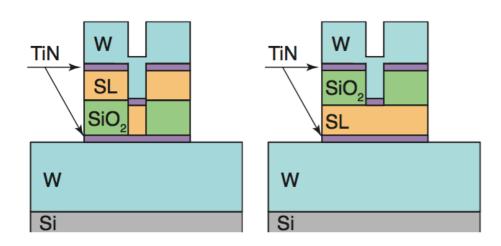


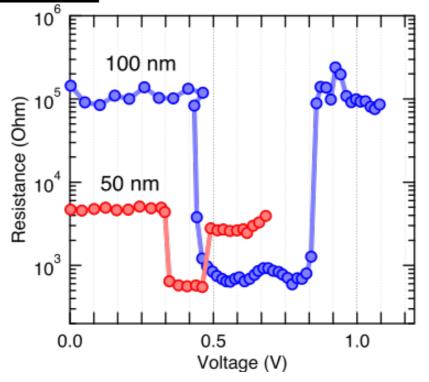
J. Tominaga, A. V. Kolobov, P. Fons, S. Murakami and T. Nakano Adv. Mater. Interfaces 1, 1300027 (2014).

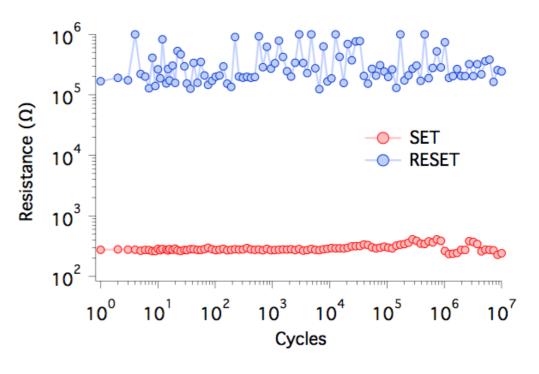


低電圧動作の確認 (最新の成果)





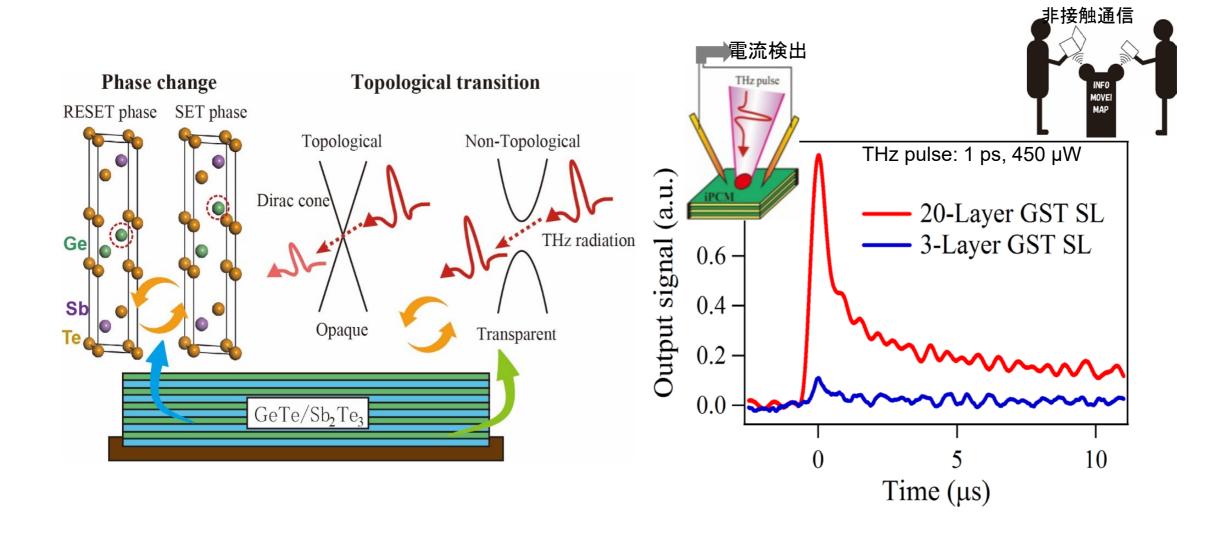




*Mitrofanov et al., Interfacial phase-change memory: effect of device structure and fabrication conditions; CIMTEC 2016.



THz応答の原理検証(最新の成果)



- 超格子層に依存したTHzパルス誘起の抵抗変化を観察
- ・世界初のトポロジカル絶縁体による室温THz検出に成功

Makino et al., FTT2015 (The Second International Symposium on Frontiers in THz Technology) 2015; E/PCOS2015 (European Symposium on Phase Change and Ovonic Science), 2015.

IMPULSE

FY 2013 2014 2015 2016以降

研究項目 ① iPCMを用いた超低パワ ーメモリの研究開発

低電力動作でのサイクル向上

>109

耐熱安定性 (新材料開発含む)

80°C/10年

共同研究先等への事業化支援、 技術サポート

2018商品化

トポロジカル特性を応用したマルチフェロイック機能デバイス (CREST)

研究項目 ② iPCMを用いた超高速動作 デバイスの制御と応用技 術開発

ピコ秒応答の電場制御特性の評価

ピコ秒制御評価技術の確立 (THz動作ON-OFF動作の検 証)

外部資金を利用した実用化に向けたプロジェクトの立ち上げ

2020企業への技 術移転完了

ピコ秒パルス制御技術の確立と新ア ーキテクチャによるデバイス創成

室温動作実証 [~]1THz



今後の展開

- 共同研究によるデータセンター用メモリの開発加速
- ・メモリを超えた新奇デバイスへの展開 スピンデバイス… >> CRESTで研究展開
- ・光技術分野への新展開 小型テラヘルツ送受信機等への応用