

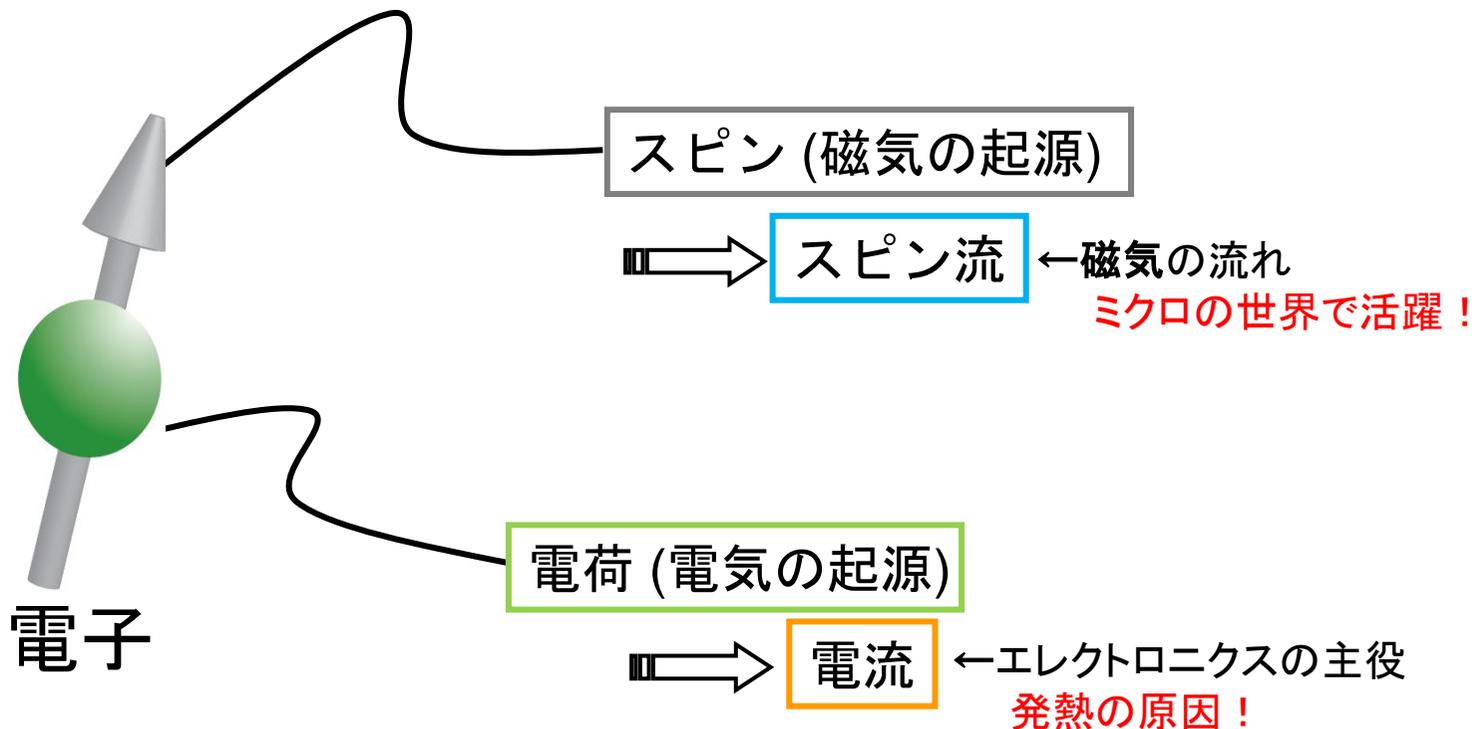
電磁気学の常識を覆す コイル不要の薄膜インダクタ

日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所 先端基礎研究センター
スピン-エネルギー科学研究グループ
マネージャー 家田 淳一

2023年6月1日

背景技術

- ▶ スピントロニクス (次世代エレクトロニクスの有力候補)



電気と磁気のハイブリッド素子

微細加工技術で利用可能になった！
100ナノメートル領域で電気より高効率に！！

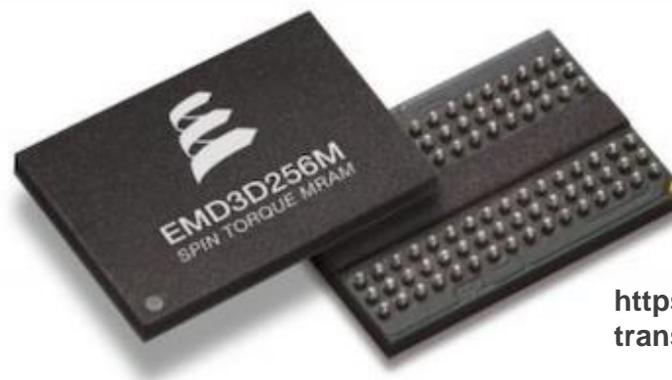
スピンを使った技術実施例



The Nobel Prize in Physics 2007



Illustration: Typoform AB © The Royal Swedish Academy of Sciences



<https://www.everspin.com/spin-transfer-torque-ddr-products>

米：Everspin社、2019年下期より
28nm世代STT-MRAMの量産開始

HDD読み取りヘッド

⇒磁気センサーの技術革新

省エネ＋小型化

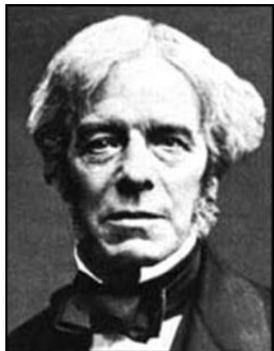
磁気ランダムアクセスメモリ

⇒メモリ素子の技術革新

省エネ＋耐放射線

微細加工でスピンは室温動作する！

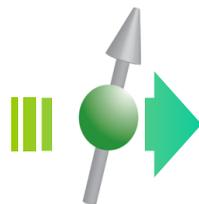
私の研究紹介



M. ファラデー

誘導起電力 (1831)

$$V_{\text{EMF}} = - \frac{dF}{dt}$$



発電機や
インダクタの
基本原理



J. 家田

スピン起電力 (2007)

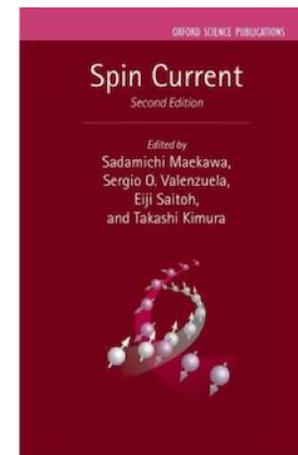
$$V_{\text{SMF}} = - \frac{\hbar}{2e} \frac{dW}{dt}$$

スピンによる発電の新原理

J. Ieda & S. Maekawa, "Spinmotive force"
Ch.7 in Spin Current 2nd ed. (Oxford Univ. Press, 2017).

平成二十八年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞
ナノ磁性体による磁気エネルギー利用法の理論研究

スピんでエネルギーの常識を覆す研究を推進



本特許申請技術

「薄膜インダクタ素子及び薄膜可変インダクタ素子」



東北大学
TOHOKU UNIVERSITY



プレスリリース

令和4年4月14日

国立大学法人 東北大学 学際科学フロンティア研究所

国立大学法人 東北大学 電気通信研究所

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

電気回路の基本要素 -インダクタ- の「ねじれ」をほどく
～電子スピンの量子相対論効果で電力制御研究に新展開～

【発表のポイント】

- スピントロニクス技術を利用した、新しいインダクタ原理を提案
- 従来のコイルや磁気構造のような「ねじれ」の必要ない「普遍的な磁性材料」でインダクタ機能が発現
- 従来技術では難しい小型素子や、機械動作部品を用いない可変インダクタへ繋がる基礎理論を確立

【論文情報】

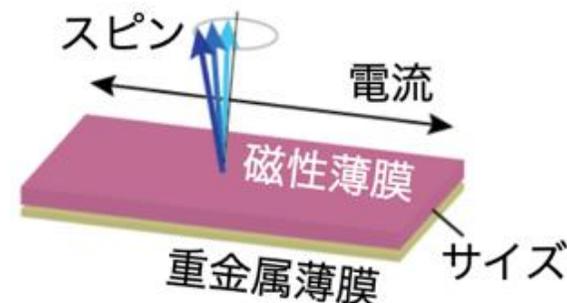
Title : "Theory of Emergent Inductance with Spin-Orbit Coupling Effects"
(スピン軌道創発インダクタンスの理論)

Authors : Yuta Yamane, Shunsuke Fukami, and Jun'ichi Ieda

Journal : Physical Review Letters

DOI : 10.1103/PhysRevLett.128.147201

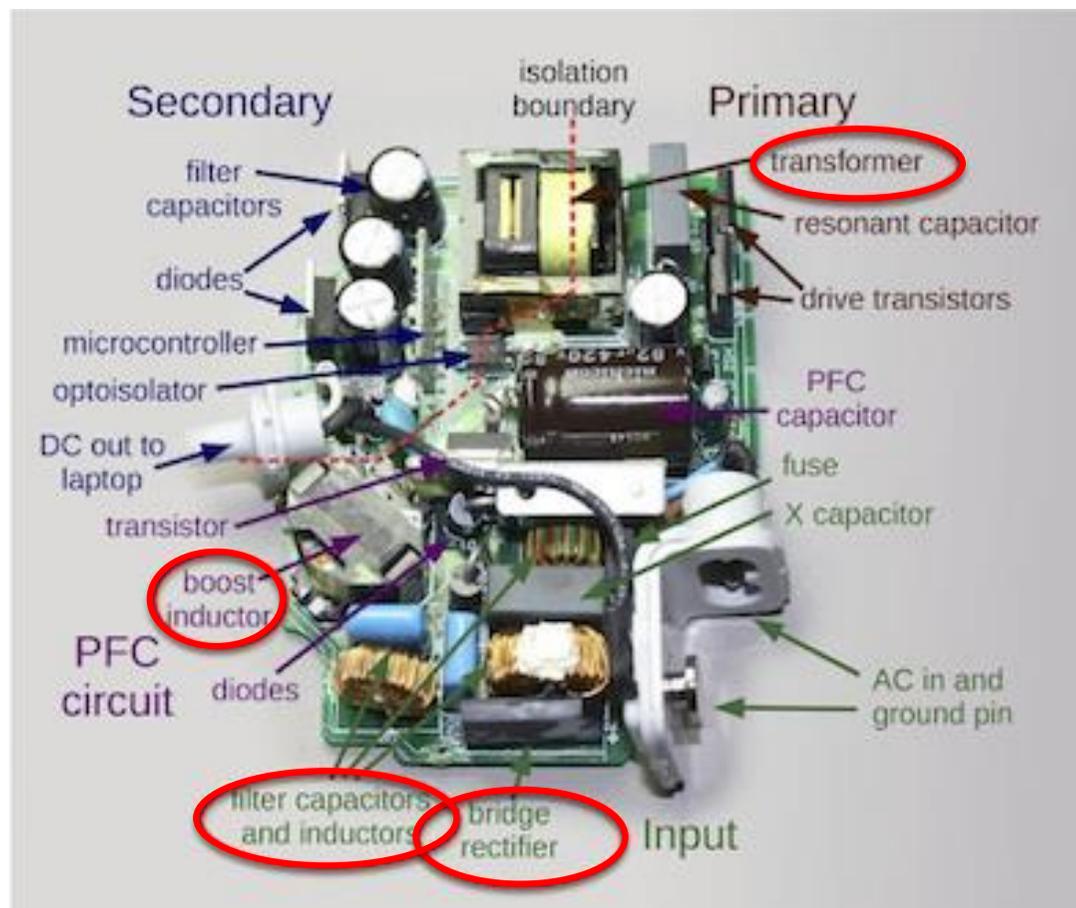
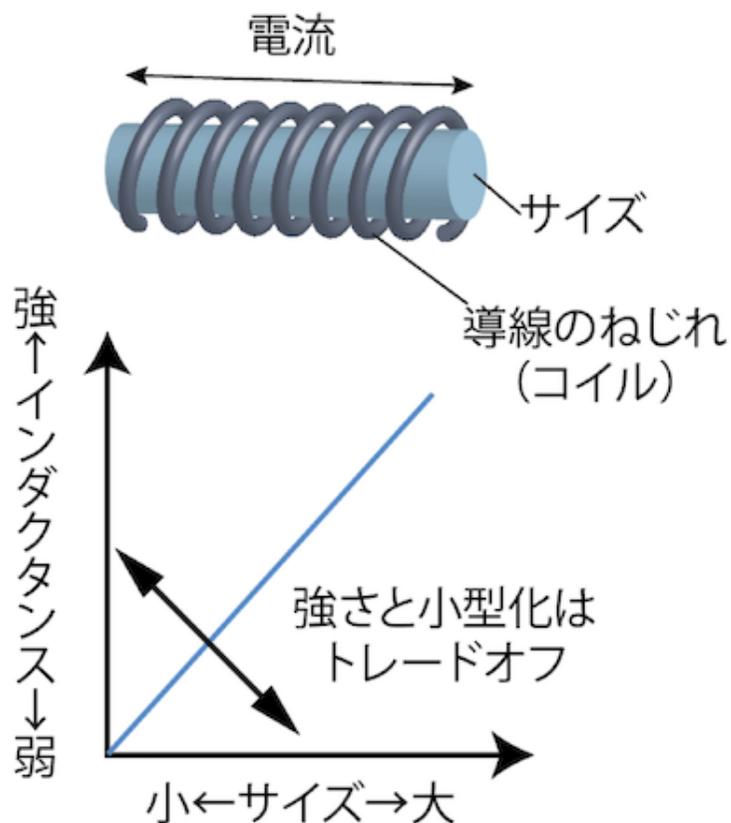
URL : <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.147201>



インダクタ

- 電力を制御する役割
 - 変圧、整流、電磁ノイズ除去、

【従来のインダクタ】

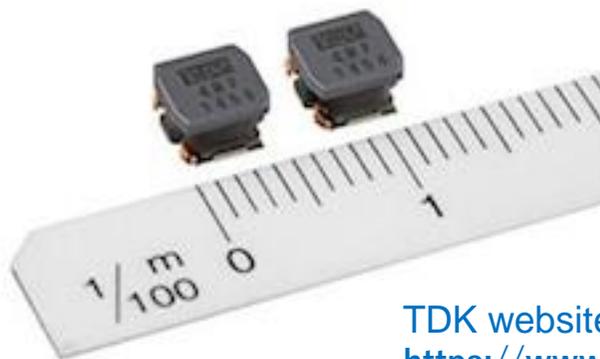


従来技術とその問題点

実用化されている**インダクタ**は、電磁気学の法則に基づいているため

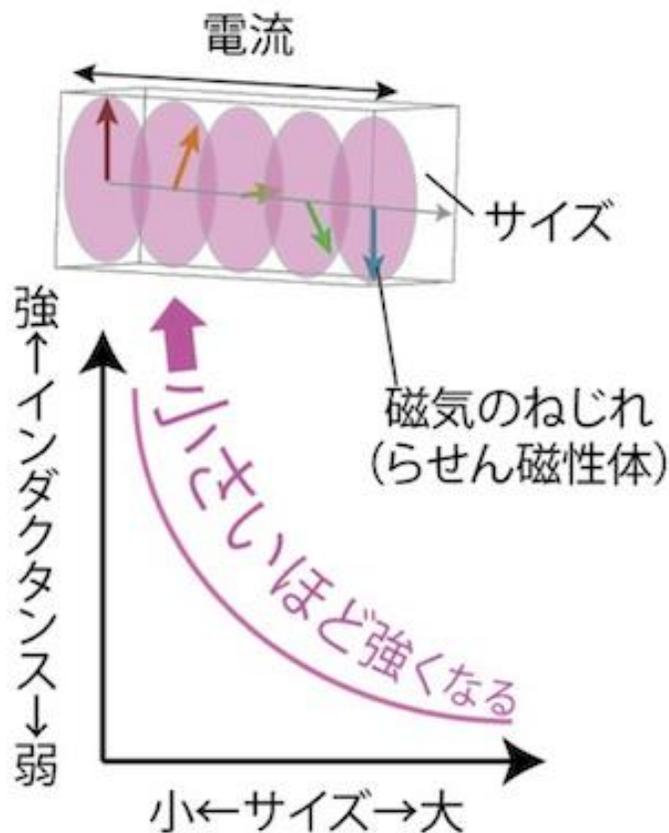
- コイル（巻線） + 磁性体の芯を使用
- 高インダクタンスには大きさが必要

等の制約があり、**電気回路の小型化に障壁。**

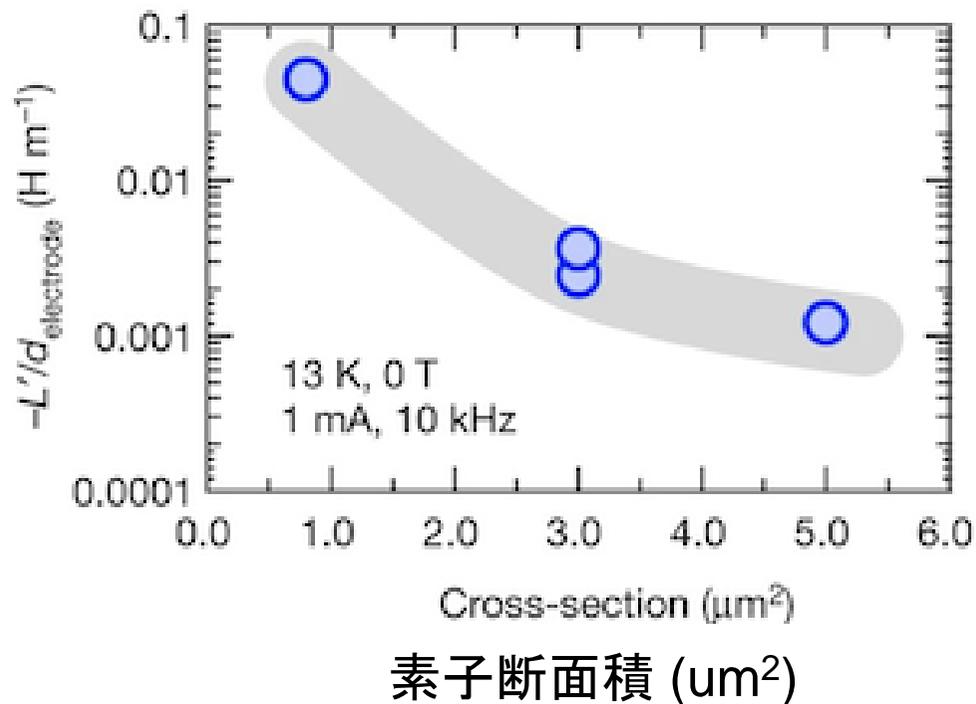


新原理:「創発インダクタ」

- ▶ 創発インダクタ (直近4年間で原理提案→実験実証)
 - 磁性体を利用したインダクタ
 - 磁性体の量子力学的効果 (スピン) を活用
 - インダクタンスは断面積に反比例
 - 薄膜化(~数nm)で高インダクタンスが実現可能



単位長さあたりの
インダクタンス(H/m^{-1})



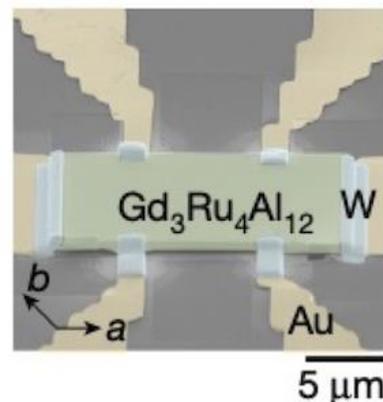
T. Yokouchi *et al.*, Nature **586**, 232 (2020).

先行する研究開発状況

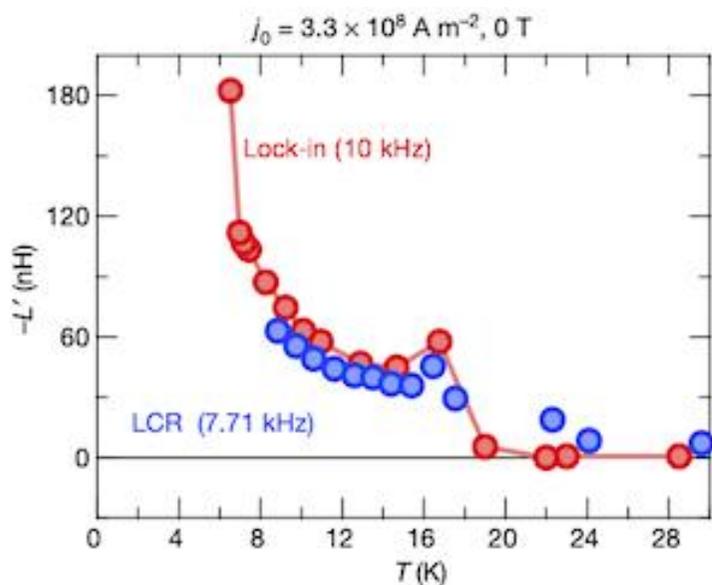
2020年10月8日
理化学研究所
東京大学
科学技術振興機構

創発電磁場によるインダクタ

—インダクタの微細化に向けた新原理の実証—



- らせん磁性を示す材料が特殊でマスピロに不向き。
- 結晶方位制御などでらせん軸方向をそろえる必要がある。
- 室温以上での利用が難しく、素子性能が温度依存（左図）。



T. Yokouchi *et al.*, Nature **586**, 232 (2020).

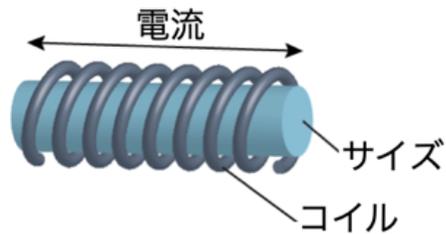
以上の理由から製品化には課題が多い。

本特許申請技術

「薄膜インダクタ素子及び薄膜可変インダクタ素子」

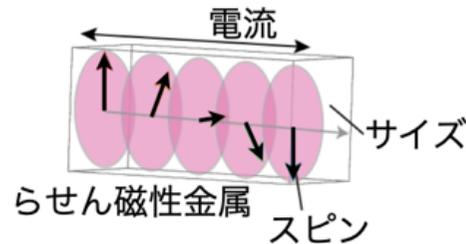
【従来インダクタ】

19世紀発明



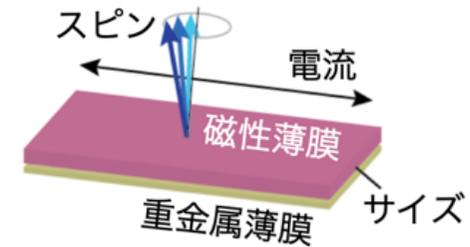
【創発インダクタ】

2019年予言、2020年実証



【スピン軌道創発インダクタ】

本研究で新たに予言



素子サイズ
依存性

強さがサイズに比例
(小型化に不利)

強さがサイズに反比例
(小型化に有利)

強さがサイズに反比例
(小型化に有利)

共振周波数

$(LC)^{-1/2}$

らせんピン止め周波数
($\sim 0.1-1\text{MHz}$)

強磁性共鳴周波数
($\sim 1-10\text{GHz}$)

ゲート電圧
による変調

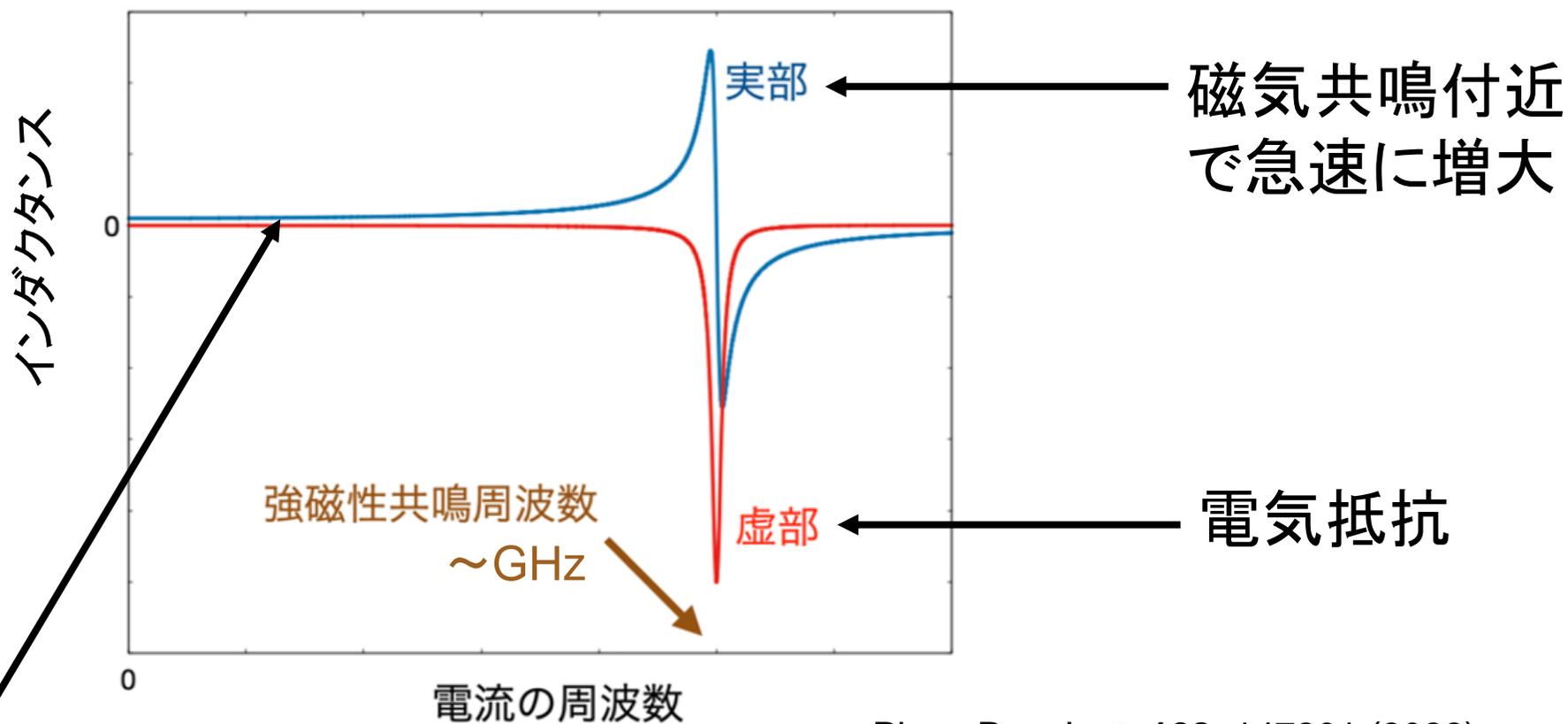
不可

不可

可能

期待される周波数特性

▶ 理論計算結果（現在実証試験を実施中）



Phys. Rev. Lett. **128**, 147201 (2022)

【超広帯域】

DCからGHz帯まで一定のインダクタンス

新技術の特徴・従来技術との比較

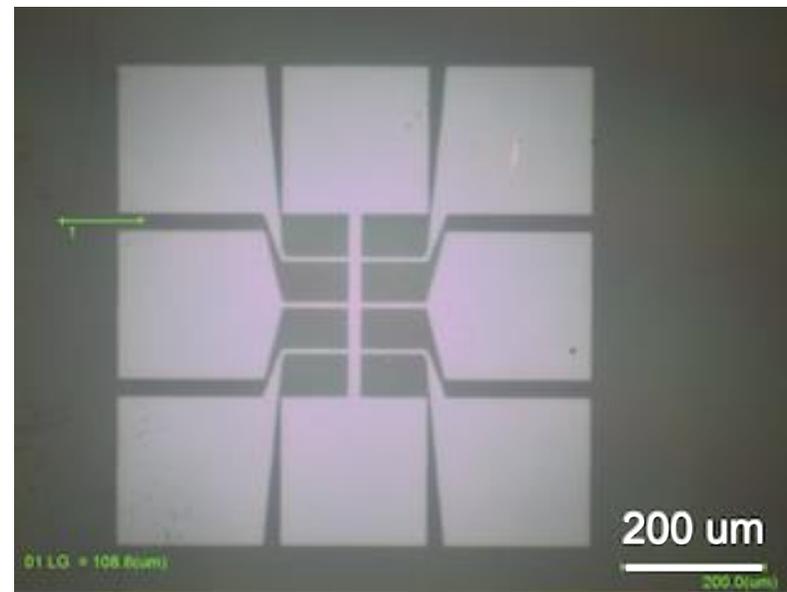
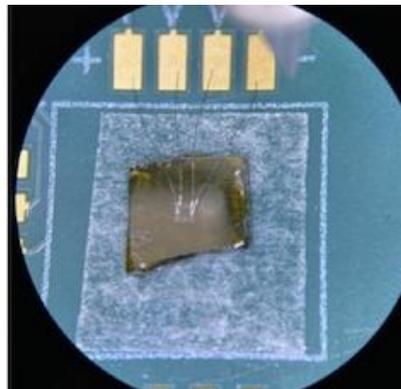
- 従来はインダクタンスの大きさと小型化に**トレードオフ**関係があったが、この問題を克服できる新原理を考案した。
- 磁性体層と重金属層による**シンプル**な素子**構造**のため、薄膜技術により作成可能。
- **高周波領域での動作**が期待でき、小型化と低消費電力化が両立できれば、集積回路への搭載など、インダクタ用途が一気に拡大。

想定される用途

- 小型化・高周波制御
 - －スマートフォンやウェアラブル端末
 - －自動車自動制御、車載用電源機器

実用化に向けた課題

- 現在、基板に形成した $10 \times 300 \text{ } \mu\text{m}^2$ の薄膜素子において100Hz程度の低周波領域でのインダクタ動作を確認している。
- 今後、GHz帯での動作検証を実施する。
- 実用化に向け、基礎データ蓄積が必要な段階。



企業への期待

- インダクタの高度化、高周波信号制御用素子を開発中の企業には、将来的に本技術の導入が有効と思われる。
- 金属材料、磁性材料に関する薄膜技術を持つ企業との共同研究の可能性。
- スピンを使ったエネルギー技術は、世界を変えるかもしれない。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 薄膜インダクタ素子及び
薄膜可変インダクタ素子
- 出願番号 : 特開2022-131304
- 出願人 : 日本原子力研究開発機構、
東北大学
- 発明者 : 家田淳一、山根結太、深見俊輔

産学連携の経歴

- 2021年 (公財)村田学術振興財団研究助成に採択
- 2021年-2023年 企業への技術説明 (国内2社)

お問い合わせ先

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
JAEAイノベーションハブ

T E L 029-284-3420

e-mail seika.riyou@jaea.go.jp