論　　文　　概　　要

九州工業大学大学院情報工学府　　情報創成工学専攻　　物理情報工学分野

学生番号	236E0322	氏　名	中塘 彩友美
論文題目	半導体輸送技術への応用を目指した超伝導磁気浮上工具の電磁界解析		

1. 緒言

半導体製造工程では、ウェーハを安全かつ効率的に移動させるためのロボットがある。このロボットの現状として、ロボット可動部の摩擦によって発生する微細な塵がウェーハ表面を汚染してしまうことが挙げられる。そこで、超伝導の性質であるピン止め効果による反発力を利用した磁気浮上の搬送装置を提案する。磁気浮上の原理を応用した磁気浮上工具(SUperconductive Assisted Machine(SUAM))は、主に超伝導体と永久磁石で構成されており[1][2]、この工具を用いることで、ウェーハを浮上させ、可動部との接触なく、そして、ウェーハ表面を汚染することなく搬送することができる(Fig. 1)。ウェーハ搬送には、安定かつ十分な反発力が必要となる。従来の研究[3][4]では、性能向上を目指して、臨界電流密度の磁場依存性が優れている超伝導線材を用いた SUAM を提案した。そこで、超伝導線材を用いた SUAM でウェーハを安定して浮上させる反発力の電磁界解析を行い、実際のウェーハ搬送に十分な力があるか、性能評価が必要であると考えた。本研究では、永久磁石と超伝導線材を用いた実験モデルと、小型化を目指した小型モデルを作成し、電磁界解析を行い、反発力の計算を行った。

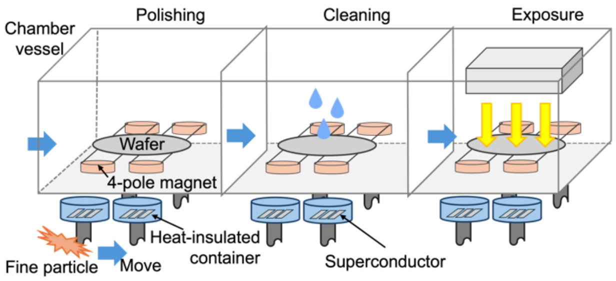

Fig. 1 Semiconductor transport process using SUAM.

2. 解析方法およびモデルの作成

本研究では、基本的な電磁界解析として、JSOL 社のシミュレーションソフト JMAG-Designer 23.1 で、有限要素法(FEM)を用いて解析を行った。

実験モデルでは、半導体搬送に必要な反発力があるかを調べるため、実験結果と計算結果を比較した。モデル作成では、九州工業大学大学院情報工学研究院知的システム工学研究系鈴木恵友研究室にて、実験で使用しているものモデルを基に作成した。線材はフジクラ製$GdBa_2Cu_3O_{7-\delta}$超伝導線材で、77.3 Kにおける臨界電流密度の磁場依存性を用いた[5]。線材のサイズは長さ 72 mm、幅12 mm、厚さ 2 μm に設定した。1 層に 6 枚、平面になるように平行に並べ(Fig. 2(a))、線材を並べた平面を垂直方向に 100 μm 間隔で 3、5、10 層積み上げたもの作成した。

実験モデルの小型化を目指した小型モデルでは、線材の長さを 72 mm から 60 mmに変更し、1 枚の平面に用いる線材の枚数を 6 枚から 4 枚に減らした(Fig. 2(b))。そして、実験モデルと比較するため、同じ面積となる実験モデル 5 層と小型モデル 9 層、同じ層数となる 5 層同士を計算し、結果の比較を行った。

また、永久磁石は実験と同様、内径9.5 mm、外径29.5 mm、厚さ10 mm、磁石表面の磁束密度が450 mTのリング型片面 4 極ネオジム磁石を作成した。

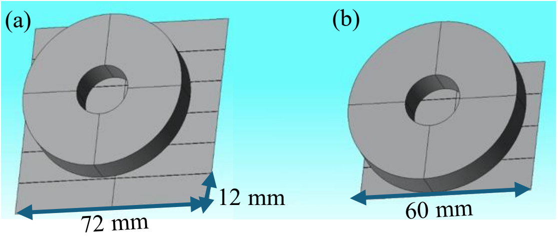

Fig. 2 A model used in experiment (a), and a model aiming to miniaturize(b).

永久磁石を超伝導線材の上部 12 mm で着磁を行い、永久磁石を超伝導線材に向かって垂直に 12 mm から 2 mm まで移動した際に発生する超伝導線材から永久磁石への反発力を計算した。また、計算の簡易化のため、永久磁石、超伝導線材、取り巻く空気の 3 要素のみで構成した。

3. 結果および考察

磁気浮上工具(SUAM)の FEM による実験モデルの反発力の計算結果と実験結果の比較を Fig. 3 に示す。グラフより、着磁位置の距離 12 mm を基準として、着磁位置から永久磁石を近づけると反発力が働き、近づく程反発力は大きな値を示すことが分かる。ウェーハを安定して浮上させるために 5 N 必要であり、3、5 層の実験モデルで磁石–線材間の距離が 6 mm の時に達成できている。

また、層数が同じである 5 層同士の比較、および面積が同じ(25,920 mm^2)である実験モデルの 5 層と小型モデル 9 層の反発力の計算結果を Fig. 4 に示す。層数が同じ 5 層モデルでは、実験モデルと同等の反発力を小型モデルで得ることができた。面積が同じモデルの比較では、小型モデルの方が、反発力が大きいという結果を得た。反発力は線材に流れる電流とその面積に影響を受ける。実験モデルでは、線材の端の方で電流が小さくなるため、小型モデルにて大きな電流が得られる必要分の面積のみを残すことで、実験モデルと同等の反発力を得ることができると考えられる。

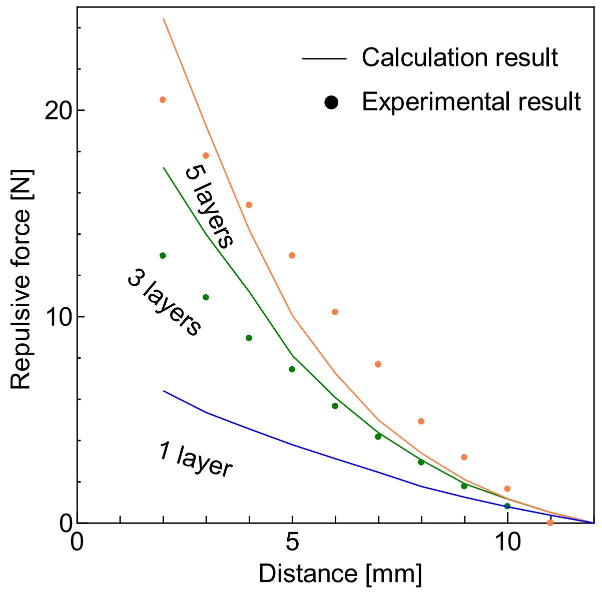

Fig. 3 Repulsive force as a function of distance with various number of layers.

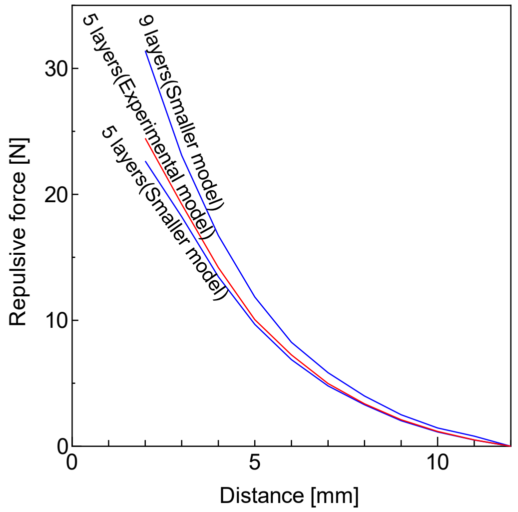

Fig. 4 Repulsive force comparison between two models with the same number of layers (5 layers each) and between a 5-layer experimental model and a smaller 9-layer model with the same area.

4. 結言

本研究では、超伝導線材を用いた磁気浮上工具のウェーハ搬送への利用のため、有限要素法(FEM)を用いた電磁界解析にて反発力の計算を行った。実験結果と計算結果の比較より、ウェーハを搬送する上で必要な反発力 5 N を磁石 – 線材間 6 mm の距離で達成できた。また、実験モデルと小型モデルの反発力比較では、電流密度の影響を得やすい小型モデルを用いることでより実験モデルと同等の反発力を得られることがわかった。

以上より、磁石 – 線材間 6 mm の距離で磁石を浮上させることで、ウェーハを安定して浮上させることができ、また、積層数が同じ、もしくは同じ面積のモデルを作成する場合では、小型モデルを用いることは有効である。

参考文献

(1) H. Nakashima, K. Suzuki et al., *Int. J. of Automation Technol.*, Vol. 15, No.2, pp. 234 – 242(2021).

(2) Y. Hiramatsu *et al* 2017, *J. Phys.: Conf. Ser.* 871 012048.

(3) Y. Kinoshita *et al* 2020, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1590 012023.

(4) S. Iwasaki *et al* 2023, *J. Phys.: Conf. Ser.* 2545 012012.

(5) 株式会社フジクラ超電導事業推進室(2024), レアアース系高温超電導線材のご紹介. https://www.fujikura.co.jp/products/newbusiness/superconductors/01/superconductor.pdf