

1. 序論

超伝導バルク磁石は、Nd-Fe-B系永久磁石の10倍以上も強力な数テスラの磁場を発生させることができ、様々な工学的応用が期待される。その中で有機半導体薄膜の微細結晶配向制御は、有機半導体を反磁性溶媒に溶解した溶液を基板の上に滴下し強磁場下におくと、モーゼ効果により磁場勾配に沿って有機半導体単結晶薄膜を配向させることができる。この手法を用いると、強磁性体による微細パターンによって超伝導バルク磁石の磁場を局所的に集中させて空間的な磁場変調を作ることで、有機半導体が微細パターン通りに配向した単結晶薄膜領域を形成することが出来る。本研究では、有機半導体薄膜の微細結晶配向制御技術の開発のために、超伝導バルク磁石上で局所的な磁場変調を発生させるための基礎的研究を行った。有限要素法を用いた磁場解析による微細パターン近傍での磁場分布の計算と、強磁性マスクパターンと超伝導バルク磁石を用いた磁場変調実験の両面から検討を行った。

2. 実験方法と解析手法

実験には研究室で開発した超伝導バルク磁石を用いた。バルクは45mmφ×15mmのSmBaCuO系超伝導バルク（同和鉱業製）であり、40Kでパルス着磁を行った結果、真空容器表面での最大磁場は2.5Tである。磁性体はJFEスチール製の方向性珪素鋼板（飽和磁化2.03T）を用いた。また、磁性体のサイズと磁性体間距離が磁場変調へ与える影響を解析的に求めるために、有限要素法解析ソフトCOMSOL Multiphysics3.4を用いて2次元解析を行った。Fig.1に実験概略図を示す。図(a)はバルク磁石を覆っている真空容器の表面に磁性体を並べた断面図で図(b)は磁性体近傍の拡大図である。磁性体の長さをL、横幅をW、磁性体間の距離をSとする。磁場変調が最大となる最適な磁性体形状及び配置を解析的に求め、磁場分布測定を行った。測定にはaxial型のHall素子（Lake Shore製、HGA-2010）を用い、磁性体から0.5mm上方を直線的に測定した。Hall素子のactive areaは0.13mm×0.13mmである。

3. 解析結果と実験結果

結果の一例として、Fig.2にL=6mm、W=0.3mmでS=3mmと4mmの磁性体を用いたときの磁場分布の計算結果と測定結果を示す。計算結果から、磁性体が配置されている場所では磁束の集中が起こることによって磁場が大きくなり、高低差が1T以上の磁場変調が実現することが分かる。しかし測定結果を見ると、磁性体付近において0.1T以下の磁場の変調が見られるだけであり、解析結果とは大きく違いが生じた。この原因として、解析を2次元で行ったため、バルク磁石の奥行きが無限遠という設定になり、その奥行きの影響を受けて磁場が大きくなってしまったと考えた。そこで3次元解析を行ったが、得られたデータは2次元解析と大きく違わず、この解析手法が差異の原因ではないことが分かった。さらに、scan位置の垂直方向の誤差により測定値が減少してしまったことが考えられたが、考察の結果、この仮定も解析値と測定値の大きな差異を説明できるものではなかった。一番有力な考えとして磁性体の飽和磁化が未設定であることが原因として挙げられるが、解決法が見つかっておらず現在検討中である。

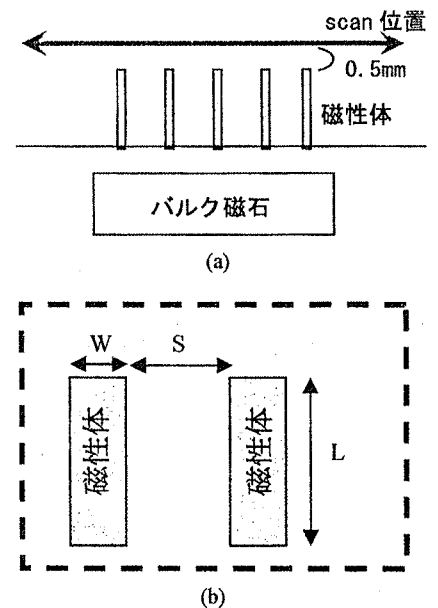


Fig.1 実験概略図

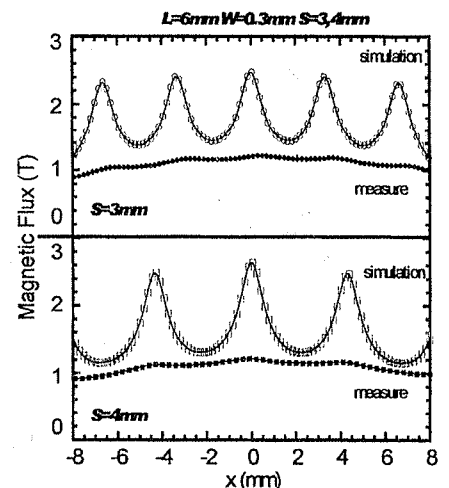


Fig.2 計算結果と測定結果の比較

4. 磁場変調の向上

次に磁性体に構造的な工夫を施すことによって磁場変調の増大を図った。本研究では磁場変調の高低差が重要であり、高低差を大きくするためには変調の山部分の増大と谷部分の減少が求められる。そこで、磁性体間のスペース部分に超伝導体 (SC) を用いてシールド効果によって磁場を排除し、谷部分の磁場の減少を試みた。Fig.3 に磁性体間に超伝導体を挟んだ時の測定結果(磁性体+SC), 磁性体のみで超伝導体を挟まずに測定を行った結果(磁性体のみ), また磁性体を置かない場合の磁場分布 (basis) を示す。超伝導体はGdBaCuO系バルクをab面4mm×10mm, c軸方向8mmで切り出したもので、測定は77Kで磁性体から0.5mm上を測定した。Fig.4 に、使用した超伝導バルクの外部磁場0~2.5TとしたM-H曲線を示す。図から超伝導バルク磁石の真空容器表面の最大磁場2.5Tでもこのバルクは臨界磁場に達しないことを確認した。この実験ではFig.3の図中に示すように、バルク超伝導体とバルク磁石との反発を避けるために、真空容器表面から超伝導体を8mm浮かせ、磁性体もL=16mmとした。この場合、超伝導体が受ける磁場は約1.0Tである。磁性体のみの場合、磁場変調の谷部分の磁場は約0.42T, 山部分の最大磁場は約0.47Tとなっているが、超伝導体を挿入することによって谷部分で0.28Tまで大幅に減少し、山部分の最大磁場は約0.6Tまで増加している。そして磁場変調の高低差は0.05Tから0.32Tに増加している。このことから磁性体間に超伝導体を挟み磁場を排除することで、磁場変調を増大出来ることが確認された。Fig.3の(磁性体+超伝導体)と(磁性体のみ)についての磁気勾配dB/dxの計算結果をFig.5に示すが、超伝導体を挟んだことにより磁気勾配dB/dxを300~400T/mまで向上させることが出来た。同様にFig.6に磁気力場BdB/dxの比較を示す。純水が浮上するために必要な磁気力場は1400T²/mであるので、この超伝導体を挟んだ磁性体を用いた実験では、水滴が浮上する可能性は低い。また磁性体を置かない場合と比較すると、磁気勾配dB/dxは約2倍となったが、磁気力場BdB/dxはBの減少のために約2~3割減少した。

5. まとめ

超伝導バルク磁石上で磁性体を用いて空間的な局所磁場変調を発生させ、有機半導体の液相成長へ実用可能な磁場高低差を目指した。解析から1.0Tを超える磁場変調が期待されたが、測定された磁場変調は解析結果より大幅に小さいものだった。その原因は解析手法にあると考えているが、現在までのところ解決されていない。磁性体間に超伝導体を挟み空間磁場を排除することにより、磁場変調の増大や磁気勾配の向上が可能であることを実験的に確認した。磁気力場の向上のためには磁性体のLを短くする等、全体的な磁場の向上が必要である。

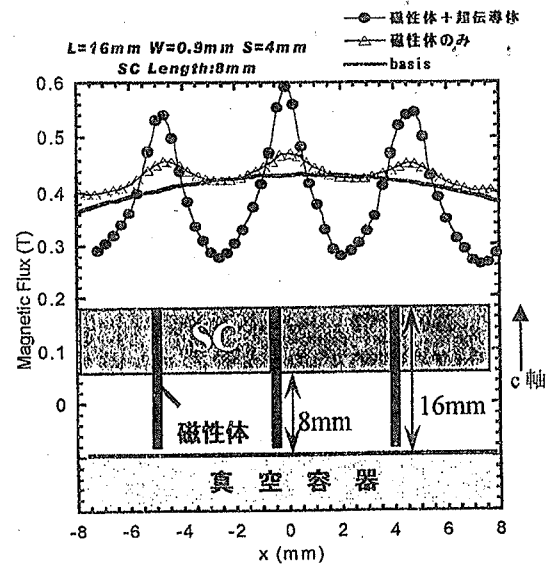


Fig.3 超伝導体を用いた磁場分布測定結果

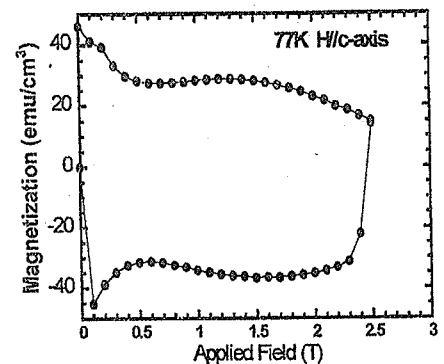


Fig.4 Gd系超伝導バルクのM-H curve

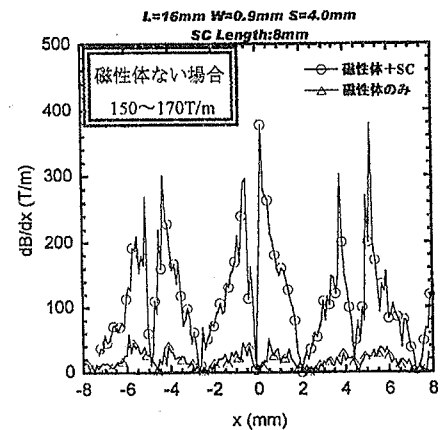


Fig.5 超伝導体を用いた磁場分布測定 磁気勾配の比較

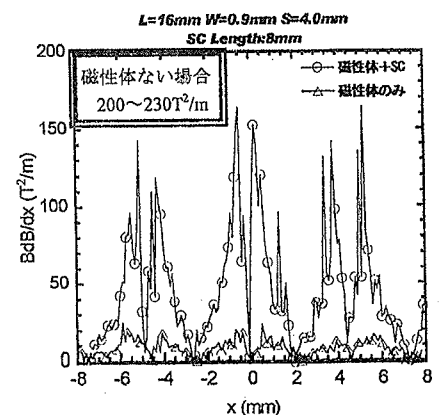


Fig.6 超伝導体を用いた磁場分布測定 磁気力場の比較