

平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

電子部品・デバイスの実装評価に必須な局所領域・空間における漏れ磁界磁化の動的挙動を可視化する技術の開発

研究開発成果等報告書

平成 24 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 ネオアーク株式会社

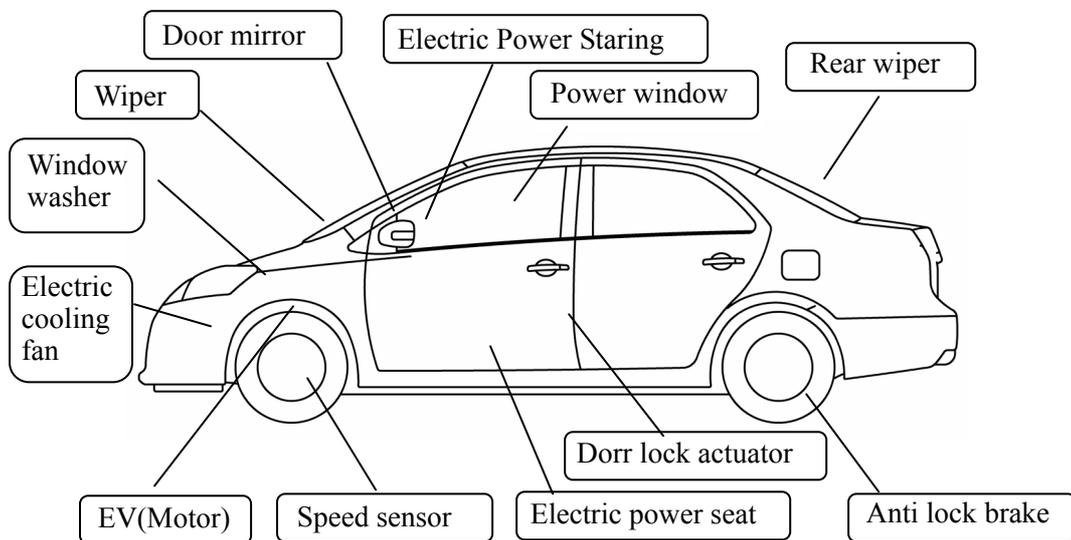
目次

第1章 研究の概要	1
1-1. 研究の背景	1
1-1-2. 研究の目的・目標	2
1-2. 研究体制	3
1-2-1. 所在地	3
1-2-2. 研究体制・管理体制	3
1-2-3. 管理員及び研究員	5
1-3. 成果概要	6
1-3-1. 実施期間	6
1-3-2. 研究成果の概要	7
1-4. 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 研究成果	8
2-1. 平行光学系(磁区観察)と集光光学系(局所磁化過程検出)との両立技術の開発	8
2-1-1. 本テーマの目的	8
2-1-2. 研究の内容	8
2-1-3. 結果	9
2-1-4. 研究詳細	9
2-2. レーザ光のインコヒーレント化による平行光学系の確立	10
2-2-1. 本テーマの目的	10
2-2-2. 研究の内容	11
2-2-3. 結果	11
2-2-4. 研究詳細	11
2-3. レーザ光のインコヒーレント化による平行光学系の確立	12
2-3-1. 本テーマの目的	12
2-3-2. 研究の内容	12
2-3-3. 結果	13
2-4. レーザ光のインコヒーレント化による平行光学系の確立	13
2-4-1. 本テーマの目的	13
2-4-2. 研究の内容	13
2-4-3. 結果	14
2-4-4. 研究詳細	14
第3章 全体統括	17
サブテーマ①のまとめ	17
サブテーマ②のまとめ	17
サブテーマ③のまとめ	18
サブテーマ④のまとめ	18

第1章 研究の概要

1-1. 研究の背景

近年、自動車産業においてはエレクトロニクス部品の普及が急速に進められており、車載用電子部品・デバイスには強磁性材料(memo:1)が多数使用されるようになってきた。その結果として、電動器(モーター)・トランス・インダクタ等の製造分野では省エネルギー化・省資源化・高効率化が強く求められるようになってきた。加えて上記デバイスを車載し省エネルギー動作させるためには、自動車の各所に高性能磁気センサが必要であり、そこにはセンサの高感度化・高耐久性化が求められている。センサ信号は電子回路により処理されるため、デバイス実装の際の高集積化かつ電磁環境適合化が求められている。



自動車の中の磁性デバイス (一例として、軟磁性・硬磁性材料をともに含むモータの使用箇所)

電子部品のデバイス実装を行う際の高集積化かつ電磁環境適合化では誤動作防止等の観点から、実装部品周辺の電磁界分布の計測が必要となる。特に高密度に実装されたプリント配線板内のICやLSIにおいては回路周辺での μm オーダーの高周波電磁界分布の計測が必要である。これらのうち、その遮蔽が困難な事から特に高周波の磁界分布測定が重要である。磁界分布の計測法としてはホールプローブ法、アンテナアレイ法等が、現在開発されてきている。しかしこれらの方法は、1).空間分解能が低い、2).動的な磁化変化が観測できない、3).走査型の計測方法であるため測定には長い時間を要する、という問題があった。

1-1-2. 研究の目的・目標

1-1-2-1. 目的

本研究開発の目的は、小型電動器・トランス・インダクタ・高感度磁気センサ等、完成形状のデバイスの、実動周波数での局所領域・空間における漏れ磁界磁化の動的挙動を可視化する技術を確立することである。この技術の確立により、自動車の電子部品・デバイスの実装高集積化・電磁環境適合化で達成すべき耐熱・高信頼性解析技術、電波雑音制御のための電磁妨害放射・電磁環境適合性実装技術の確立等を可能にする。研究の目標として、空間分解能 $1\mu\text{m}$ オーダー、時間分解能 500ps 以下の磁区観察と局所磁化過程検出を実現し、完成形状のデバイスの、実動周波数での局所領域・空間における漏れ磁界磁化の動的挙動の可視化を行う。

1-1-2-2. 目標

本研究開発では、事業管理者が業界をリードしている「可視光をプローブとした「磁気光学効果」(memo:1)を発展させ、磁区観察技術および、局所磁化過程検出技術の改善を図るとともに、これらの光学系の両立を図る。

まず、磁区観察に好適な白色光を用いた平行光学系と、局所磁化過程検出に好適なレーザー光を用いた集光光学系の、相反する光学系を両立可能な光学系を構築する。

時間分解能を向上させるための取り組みとして、汎用半導体レーザーの短パルス光発振技術(の開発を行う。

上記の汎用半導体レーザーの短パルス光発振技術を磁区観察の時間分解能向上に応用するための取り組みとして、レーザー光のインコヒーレント化(memo:2)による平行光学系の確立を図る。

これらにより、空間分解能 $1\mu\text{m}$ オーダー、時間分解能 500ps 以下の磁区観察と局所磁化過程検出を実現し、完成形状のデバイスの、実動周波数での局所領域・空間における漏れ磁界磁化の動的挙動の可視化を目指す。

1-2. 研究体制

1-2-1. 所在地

① 事業管理者

ネオアーク株式会社 東京営業部(最寄り駅:JR 中央線 八王子駅)
〒192-0015 東京都八王子市中野町2073-1

② 研究実施場所(主たる研究実施場所については、下線表記。)

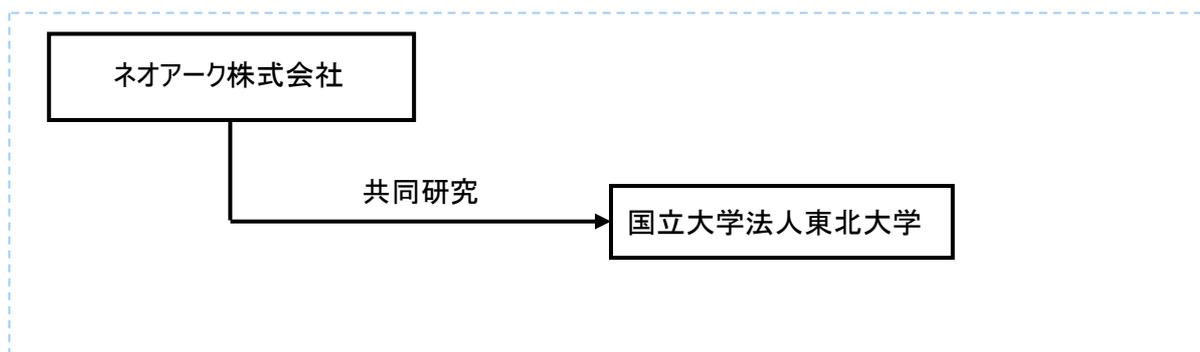
ネオアーク株式会社 東京営業部
(最寄り駅:JR 中央線 八王子駅) <再掲>
〒192-0015 東京都八王子市中野町2073-1

③ 国立大学法人東北大学

(最寄り駅:JR 東北新幹線 仙台駅 東北大学工学部中央停留所)
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻青葉6-6-05

1-2-2. 研究体制・管理体制

研究組織(全体)



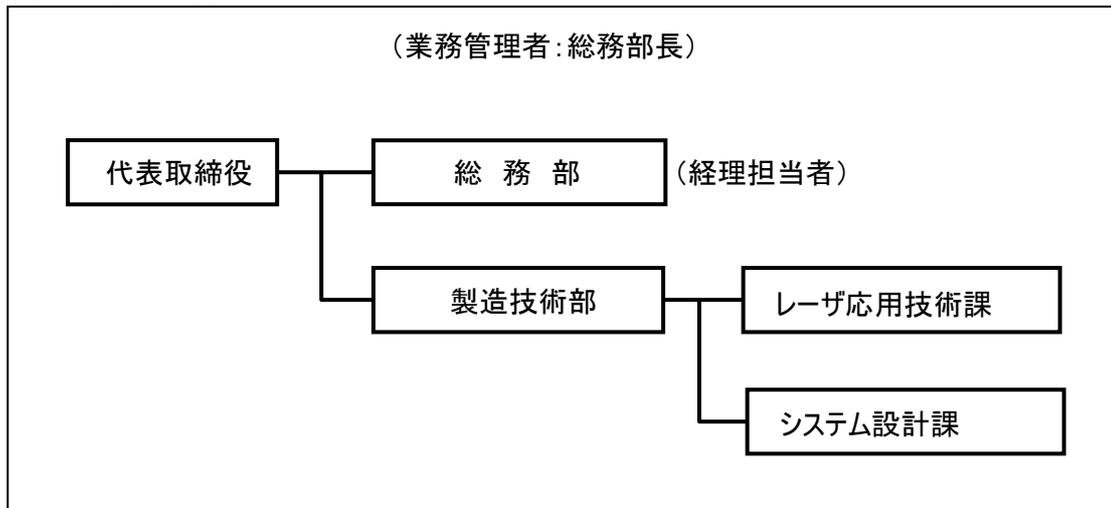
統括研究代表者(PL)
ネオアーク株式会社
製造技術部
部長代理
目黒 栄

副統括研究代表者(SL)
国立大学法人東北大学
大学院工学研究科電子工学専攻
教授 高橋 研

管理体制

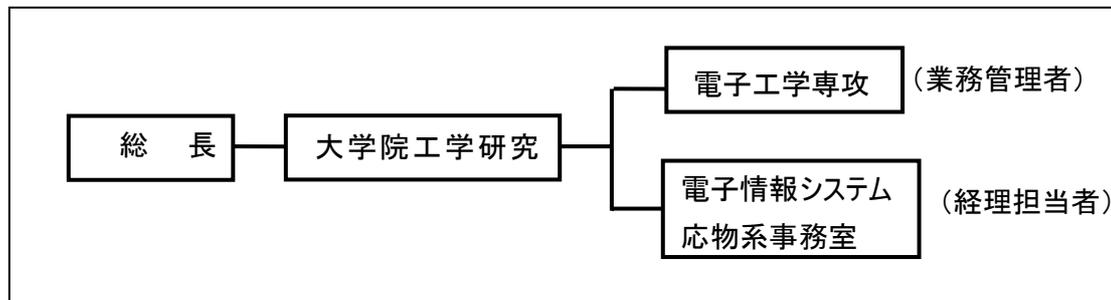
【事業管理者】

【ネオアーク株式会社】



【共同研究先】

【国立大学法人東北大学】



1-2-3. 管理員及び研究員

事業管理者： ネオアーク株式会社

管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
寺原 俊昭	総務部 部長	⑤

研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
目黒 栄	製造技術部	①③④
古谷 泰司	製造技術部	②④
柳沢 栄二	製造技術部	①③④

共同研究先： 国立大学法人東北大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
高橋 研	東北大学 大学院工学研究科 電子工学専攻 教授	④
齊藤 伸	東北大学 大学院工学研究科 電子工学専攻 准教授	①③④
杜 関祥	東北大学 大学院工学研究科 電子工学専攻 研究員	④

経理担当社及び業務管理者の所属、氏名

1. 事業管理者

ネオアーク株式会社

経理担当者

ネオアーク(株) 総務部長

寺原 俊昭

業務管理者

ネオアーク(株) 総務部長

寺原 俊昭

2. 共同研究先

国立大学法人東北大学

経理担当者

東北大学工学部工学研究科 電子情報システム・応物系事務室長

武藤輝芳

業務管理者

東北大学大学院工学研究科 電子工学専攻

高橋 研

1-3-2. 研究成果の概要

実施内容

- ① 平行光学系(磁区観察:白色光)と集光光学系(局所磁化過程検出:レーザー光)との両立(実施:ネオアーク株式会社、東北大学)
平成 21 年度事業成果より、集光光学系を基本とし、レンズの挿入抜去により平行光学系に切替る切替機構開発に関する設計を完了、22 年度は、これら設計に基づいて試作並びに調整の一部を実施し、磁性材料の磁化の方向を選択的に観察する技術として複数の入射方向から照明してその磁区像を観察する技術の確立、視野が 10mm 角程度必要な比較的大きな磁区構造(たとえば方向性電磁鋼板の磁区)を観察できる光学系を設計、試作した。
- ② 汎用半導体レーザーの短パルス光発振技術の開発(実施:ネオアーク株式会社)
平成 21 年度の事業成果により、短パルスレーザー光源を開発した。22 年度は、このレーザー光源をサブテーマ④の装置に適用するために、繰返し～50kHz の極小短パルス(パルス幅<1 ナノ秒)を実現するパルス発生回路の設計、試作、性能評価を行った。
23 年度はこれらの成果を集約しサブテーマ 4 の汎用型電磁環境・磁化過程可視化実験装置に組み込むと共に、単体としても製品化可能なため、短パルスレーザー光源装置を試作した。
- ③ レーザ光のインコヒーレント化による平行光学系の確立(実施:ネオアーク株式会社、東北大学)
平成 21 年度の事業では、レーザー光のインコヒーレント化原理の調査および実現のための実験を実施した。屈折率分布を有する透明物質を用いた平行光学系の一部を試作して、実際の観察エリア内のスペックルノイズ(memo:3)抑制状態を検証・評価した。22 年度に、上記の方法を再検討した結果、現状ではこの技術が最良であると判断した上で、本研究テーマを終結させた。
- ④ 汎用型電磁環境・磁化過程可視化実験装置試作(実施:ネオアーク株式会社、東北大学)
平成 22 年度には、この実験試作機の設計・試作に着手して一部組み立てた。
平成 23 年度は実験試作機を完成させると共に性能評価を行った。
磁心材料(カットコア)をモータステータなどのデバイスに想定してコアを励磁した時に断面部に発生する空間磁場に対して、磁気光学効果によりその強度分布をガーネット膜(memo:5)のファラデー効果を応用した磁気転写膜(memo:6)を用いて検出、可視化した。
性能評価として空間磁場の高さ方向分布計測を行いシミュレーションによる結果と比

較したところ、非常によく一致した。

また、ストロボ法（memo:8）による動的挙動の一括可視化評価を行い一括計測が可能な事を確認した。

③ プロジェクトの管理・運営

- ・事業管理者・ネオアーク株式会社において、本プロジェクトの管理を行った。プロジェクトの研究経緯と成果についてとりまとめ、成果報告書を作成した。
- ・本研究開発の実用化に向けた到達の度合いを検証するとともに、事業化や製品開発における課題等について、研究実施者と打合せ・調整等を行った。
- ・東北大学と面談、電子メール、電話などで頻繁に打合せを行い、機能的に連携し、各サブテーマにおいて効率的なプロジェクトの運営を行うことで、最大の成果が得られるように管理した。

1-4. 当該研究開発の連絡窓口

ネオアーク株式会社 製造技術部 目黒 栄

Tel:042-627-7211 Fax:042-627-5110

e-mail: meguro@neoark.co.jp

第2章 研究成果

2-1. 平行光学系(磁区観察)と集光光学系(局所磁化過程検出)との両立技術の開発(サブテーマ①)

2-1-1. 本テーマの目的

漏れ磁界・磁化の動的挙動に関しては、マクロ的な検出(磁区観察)とミクロ的な検出(局所磁化過程検出)の両方が必要である。各々の検出のみを可能にする装置は既に製造されているが、絶対測定位置精度を考えた場合、マクロ的な検出(磁区観察)とミクロ的な検出(局所磁化過程検出)の両方を1台で測定できる装置が必要となる。そこでマクロ的な検出(磁区観察)とミクロ的な検出(局所磁化過程検出)の両方を1台で測定を可能にするための平行光学系(磁区観察)と集光光学系(局所磁化過程検出)との両立技術の開発を目的とする。

2-1-2. 研究の内容

(a)平行光学系と集光光学系切替機構の設計及び試作(サブテーマ④にも関連)

平行光学系と集光光学系という、相反する光学系を両立させるため、集光光学系を基本とし、レンズの挿入抜去により平行光学系に切替る切り替え機構を開発するとともに、レンズ系の最適化を行うことにより専用光学系を設計、試作を試みた。

(c) 広い視野における磁区構造の観察を実現する光学系の開発

たとえば方向性電磁鋼板(memo:9)の磁区のように視野が 10mm 角程度必要な比較的大きな磁区構造を観察できる光学系を設計、試作した。

2-1-3. 結果

(a) 平行光学系と集光光学系切替機構の設計及び試作

平行光学系と集光光学系という、相反する光学系を両立させるため、集光光学系を基本とし、レンズの挿入抜去により平行光学系に切替る切り替え機構を開発するとともに、レンズ系の最適化を行うことにより専用光学系を設計、試作した。

(b) 広い視野における磁区構造の観察を実現する光学系の開発

視野が 10mm 角程度必要な比較的大きな磁区構造(たとえば方向性電磁鋼板の磁区)を観察できる光学系を設計、試作した。

2-1-4. 研究詳細

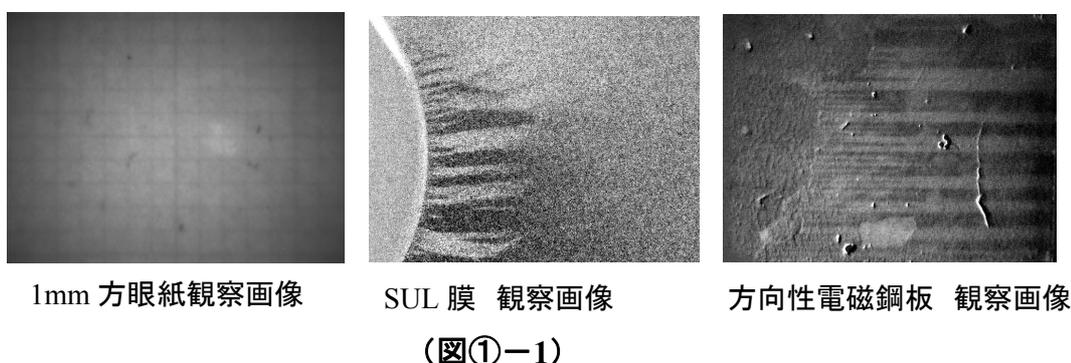
(a) 平行光学系と集光光学系切替機構の設計及び試作(サブテーマ④)にも関連)

レーザー光による磁区観察用平行光学系と局所磁化過程検出用集光光学系の両立を実現するための光学設計、試作を行った。局所磁化過程検出を行う場合はレーザー光を最大限に集光する集光光学系が必要になる。これを実現するには対物レンズの有効径でのケラレがなく、最も太いビームを入れる必要がある。また、レーザー光の波面収差も影響するため、使用するレンズの収差を十分に考慮する必要がある。これらを踏まえて光学設計、試作を行った。次に、上記で設計した集光光学系の光路にレンズを追加することにより対物レンズの像側焦点位置にレーザー光を集光することにより試料を平行光で照明する事が可能となる。この場合、レーザー光の強度分布が問題となるため、観察エリアの大きさや強度分布を考慮して光学設計を行った。平行光学系用に追加したレンズは位置再現性のある機構で光路に対して挿入抜去可能となるよう設計並びに一部の試作を実施した。また、パルスレーザー光による磁区観察や局所磁化過程の検出を行うにあたり、試料の観察／検出場所を事前に特定する必要がある。これを実現する簡便な方法としては従来の白色光による静的な磁区観察が有効である。そこで、白色光による磁区観察機構も取り入れた光学系の設計並び試作を実施した。

(c) 広い視野における磁場検出／磁区構造観察を実現する光学系の開発

電気自動車等に用いられる小型モータの磁極サイズは小さくても 10mm 以上はあり、これまでに試作してきた顕微鏡光学系を用いた空間磁場の検出方法では困難である。また、方向性電磁鋼板やアモルファスリボンの磁区寸法もミリメートルオーダーであり、これら大きな磁区構造の一括観察も関連市場から強く要求されている。そこで、10mm 前後の磁場

一括検出および磁区観察可能とする技術を開発して、光学系を設計した後に社内部品を利用して検出部を試作した。東北大学から提供いただいた2.5インチハードディスクSUL単層膜(memo:11)の内周部の磁区構造および方向性電磁鋼板の磁区の観察が可能なことを確認した。今後、ガーネット膜やファラデーガラス(memo:12)の薄板を用いた空間磁場検出を試みる予定である。(図①-1)の左の画像はこの光学系を用いて観察した1mm方眼紙の観察画像であり、横方向14mm縦方向10.5mmの視野が得られている事が確認できた。下段中央は東北大学から提供いただいた2.5インチハードディスクSUL単層膜の内周部の磁区を観察した画像、下段右側は方向性電磁鋼板の磁区を観察した画像であり、それぞれmmオーダーの磁区構造が観察できていることがわかる。



2-2. 汎用半導体レーザーの短パルス光発振技術の開発

2-2-1. 本テーマの目的

高周波領域における局所的磁化過程の検出を行うためには、

1. 微小領域の計測が可能であること。(～数 $\mu\text{m}\phi$)
2. 高速な応答性を保有すること。(～1GHz)

の条件が必要とされる。

半導体レーザーはパルス状の電流を印加すると、印加したパルス状電流波形に相似な光を放出するため、固体レーザー等に比べて発振制御が容易である。また半導体レーザー光は容易に～数 $\mu\text{m}\phi$ の領域に集光することが可能であるという利点をもつ。このため、高周波領域における局所的磁化過程の検出用測定プローブ光としては、半導体レーザーを用いることが良いと考える。

局所的磁化過程の検出用測定プローブ光には、それを用いてシステムを構成する際に使われる電子機器類の性能上の制約から極短パルスを低周期の繰り返しで発生させる必要がある。極短パルス発生に関しては、平成21年度サポイン事業にて開発した。平成22年度は、極短パルスを低周期の繰り返しで発生させるパルス発生回路の開発を行った。

平成23年度はこれらをサブテーマ④の汎用型電磁環境・磁化過程可視化実験装置に組み込むための光源の装置化を行った。

2-2-2. 研究の内容

(a)繰返し～50kHz の極小短パルス(パルス幅<1 ナノ秒)を実現するパルス発生回路の設計、試作

(b)半導体レーザヘッドと電源部、パルス発生回路を一体化することにより装置化を行った。

2-2-3. 結果

(a)パルス幅 1 ナノ秒(半値幅にて) 繰返し周波数 50kHz を実現するパルス発生回路の設計及び試作に成功した。

(b)パルスレーザ光源の装置化および性能評価を行い、平成 21 年度および平成 22 年度に得られた性能を満足している事を確認した。

2-2-4. 研究詳細

(a)繰返し～50kHz の極小短パルス(パルス幅<1 ナノ秒)を実現するパルス発生回路の設計、試作

設計及び試作を行うパルス発生回路の条件として

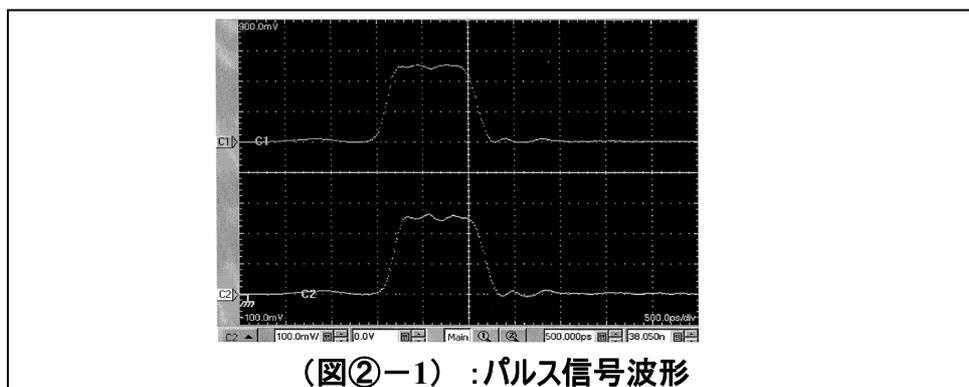
1.パルスの立ち上がり及び立ち下りが可能な限り急峻なこと。

2.パルス幅対パルス繰返し周期(周波数)比(デューティー比)が<0.01%になること。

がある。パルスの立ち上がり及び立ち下がり特性は、プローブ光として使用する半導体レーザの発光幅を決定する重要な項目である。

半導体レーザの発光幅は、測定可能な最小時間間隔(分解能)を決定する重要な要素である。分解能最大にするために立ち上がり及び立ち下がり特性を可能な限り急峻にする必要がある。これらの点を考慮して設計を行った。(図②-1)は試作したパルス発生回路の信号波形である。立ち上がり立ち下りとも約 200 ピコ秒 パルス幅約 1 ナノ秒と短パルスを実現することが確認された。

(b)平成 21 年度に開発した LD のパルス駆動回路と LD 素子を一体としパルス半導体レーザヘッド化を行った。また、平成 22 年度に開発したパルス発生回路と駆動用電源を一体化し駆動電源化を行った(図②-2)。パルス波形の確認を行い所定の性能を満足していることを確認した。





2-3. レーザ光のインコヒーレント化による平行光学系の確立

2-3-1. 本テーマの目的

レーザ光を計測分野に応用する際に、ア)良好な収束性、イ)大きなエネルギー密度、ウ)強い干渉性等の性質が積極的に利用される。本研究でもレーザ光を用いて、磁気光学効果により空間分解能 $1\mu\text{m}$ オーダーの磁区観察と局所磁化過程検出のためのプローブに用いることから、ア)、イ)は利点となるが、一方でウ)の強い干渉性はさまざまな問題を引き起こす原因となる。たとえば、レーザ光が偏光プリズム(memo:13)や波長板(memo:14)等の光学素子を通過する際に、表面反射と裏面反射が干渉する、あるいは検出対象の端部、境界で発生する回折光が干渉すること等がしばしば起こるが、これらは検出信号に対する雑音の原因となる。また、観察対象の表面が荒れている場合、反射光が散乱し、この散乱光による干渉でスペckルノイズ(砂粒を撒き散らしたようなパターンのノイズ)が発生し、これも検出信号に対する雑音の原因となる。

そこで本研究では、上記ア)、イ)の利点をできるだけ損なわずに、ウ)の可干渉性(memo:15)を抑制する手段方法について研究すること目的とする。

2-3-2. 研究の内容

これまでに、レーザ光のインコヒーレント化の手段として、1)透明ないしは半透明な媒質中を通過するレーザ光に対して、媒質の光学的特性(屈折率、複屈折率等)を変化させたときに生じる光の特性の時間的変化を応用する方法や、2)レーザ発振器の電源に高周波電流を重畳して発振条件を時間的に変化させて光の特性に時間的変化を与える方法等が提案されてきた。今回は1)の手段によるインコヒーレント化の試みに対して実験装置を構築してその効果を評価した。

2-3-3. 結果

1)の方法で光学系の最適化ならびに樹脂材料の選定を行った結果、磁区観察を行うに十分な干渉性の抑制が実現可能されたので、レーザ光のインコヒーレント化には本方法が現状では最良の手段であることを確認して本研究を終了させた。

2-3-4. 研究詳細

透明または半透明な樹脂はその部位ごとに屈折率など光学的な性質が分散しているので、このような樹脂による回転円板を作成してレーザ光を通過させることにより、結果として光の可干渉性を時間的空間的に変化させる事が可能であり、樹脂の表面に凹凸がある場合はさらに光の可干渉性を変化させることが可能であることが判明した。社内にある磁区観察装置に連続発振動作のレーザ光源と樹脂による回転円板組み合わせることによりパーマロイ薄膜パターンを観察することにより評価を行った。種々の樹脂製回転円盤をテストし最も良く干渉性を抑制可能材料を選定し、パーマロイ薄膜パターンの磁区観察を行う事でその効果を確認した。磁区観察を行うに十分な干渉性の抑制が確認できたため、本サブテーマを完了した。

2-4. 汎用型電磁環境・磁化過程可視装置の実験機の試作と評価

2-4-1. 本テーマの目的

本テーマの目的は、以下のサブテーマの研究成果を視野に収めつつ、局所領域・空間における漏れ磁界の動的挙動を可視化するための汎用型の電磁環境・磁化過程可視化実験試作システムを構想することである。本テーマの構想を具体化することは最終的には、小型電動器・トランス・インダクタ・高感度磁気センサ等、完成形状のデバイスの、実動周波数での局所領域・空間における漏れ磁界・磁化の動的挙動を可視化する技術の確立に直結する。

- * サブテーマ①の平行光学系(磁区観察:白色光)と集光光学系(局所磁化過程検出:レーザ光)との両立
- * サブテーマ②の汎用半導体レーザの短パルス光発振技術の開発
- * サブテーマ③の観察エリア内のスペckルノイズを抑制するためのレーザ光のインコヒーレント化による平行光学系の確立

2-4-2. 研究の内容

- (a)空間磁場・磁化過程可視化装置実験機の試作
実験機的设计・試作を行い実験試作機を具現化した。
- (b)磁気転写膜の作成実験
磁気転写膜の作成実験を行った。
- (c)試作装置の性能評価
完成させた試作装置の性能評価として磁気転写法による磁気デバイスサンプルの空間磁場の検出と可視化を行った。

(c-1)空間における磁場強度分布の一括検出実験

広視野光学系を用いて磁気転写法による空間磁場の可視化実験を行う。実験対象となる試料には小型電動機の固定子に用いられる電磁鋼板を積層した材料を用いる。

(c-2)空間磁場の動的挙動検出実験

広視野光学系を用いて磁場の動的挙動を一括検出する実験を行う。平成 22 年度はパルス光源の発光制御によるストロボ法(memo:8)で行ったが、平成 23 年度はイメージンテンシファイアおよび高速度カメラによる連続画像取り込みによる画像取得を試行する。

2-4-3. 結果

(a)空間磁場・磁化過程可視化装置実験機を完成させた。

(b)有機金属溶液を用いた磁気転写膜の作成実験を平成 22 年度に引き続き行った。成膜条件の変更と成膜環境の整備により実用可能な磁気転写膜の作成に成功した。

(c)磁気転写法による磁気デバイスサンプルの空間磁場の検出と可視化の実現を目指して以下記(c-1)～(c-2)の実験を行った。

(c-1)空間における磁場の強度分布の検出実験を行った。小型電動機の固定子に用いられている電磁鋼板を積層した材料の、断面部からの高さ方向の磁場を可視化する実験を行った結果コンピュータシミュレーションと一致した。

(c-2)ストロボ法(memo:8)により空間磁場の動的挙動を検出する実験を行った。結果は平成 22 年度に実施したリアルタイム検出による結果とよく一致したことから、空間磁場の強度分布、及び時間変化を磁気転写法により一括検出するための基本技術が確立されたといえる。

2-4-4. 研究詳細

(a)空間磁場・磁化過程可視化装置実験機の設計・試作

平成 21 年度に構想した実験試作機を具現化するため、平成 22 年度に設計・試作に着手した実験試作機を完成させた。すなわち、「可視光をプローブとした磁気光学効果」を発展させ、磁区観察技術および、局所磁化過程検出技術の改善を図るとともに、これらの光学系の両立を図った。まず、サブテーマ①の研究成果により磁区観察に好適な白色光を用いた平行光学系と局所磁化過程検出に好適なレーザ光を用いた集光光学系による光源部を一体化した光学系を設計し試作した。(図④-1)完成した実験試作機の外観を示す。装置は光学系を搭載した鏡基に対象試料を装着・移動して任意の部位の測定ができるためのXYZ電動ステージと、正確な位置決めのための精密ピエゾステージとが取り付けられ、さらに試料に磁場を印加するための電磁石等が組みつけられている。このような構成・構造により、本研究の目標である磁場・磁化の動的挙動可視化実現(磁区観察、磁化過程検出、磁気転写法による空間磁場検出等)という課題への具体的な対応を可能にすることを目指した。

(b)磁気転写膜の作成実験

平成 22 年度に引き続き有機金属溶液を用いて GGG 基板上への磁気転写膜の作成実験を行った。条件だしおよび環境整備により均一な転写膜の作成が可能となった。

(c)試作装置の性能評価

磁気転写法による磁気デバイスサンプルの空間磁場の検出と可視化

GGG 基板上に成膜した Bi:YIG ($Y_{3x}Bi_xFe_5O_{12}$ 等)の磁気光学効果を利用して、磁気転写法(磁場が薄膜を貫通する際にその大きさに比例して生じるファラデー効果を磁気光学効果検出の原理を用いて可視化する方法)により空間磁場の強度分布及び時間変化の可視化を 22 年度に試み、磁気転写の原理を用いた空間磁場可視化小型プローブの製作、走査法による空間における磁場の強度分布の検出、空間磁場の動的挙動検出を行った。平成 23 年度はこれらの手法を川下ユーザからの要望が多くなって来ている mm オーダー以上の一括検出に対応するため広視野光学系への適用を試みた。

(c-1)空間磁場の高さ方向強度分布の一括検出

空間磁場分布の高さ方向の強度分布を一括検出するための実験を行った。

実験サンプルとしては実機に近いモデルとして、モータのステーター部の一部を切り取った形状に近いカットコア材料を使用した。検出には一括検出を行うため、広視野装置を用いた。

(図④-2)は計測結果とコンピュータシミュレーションの結果を比較したものである。

高さはカットコアに密着させた状態および高さ 0.2mm、0.5mm で計測を行った。

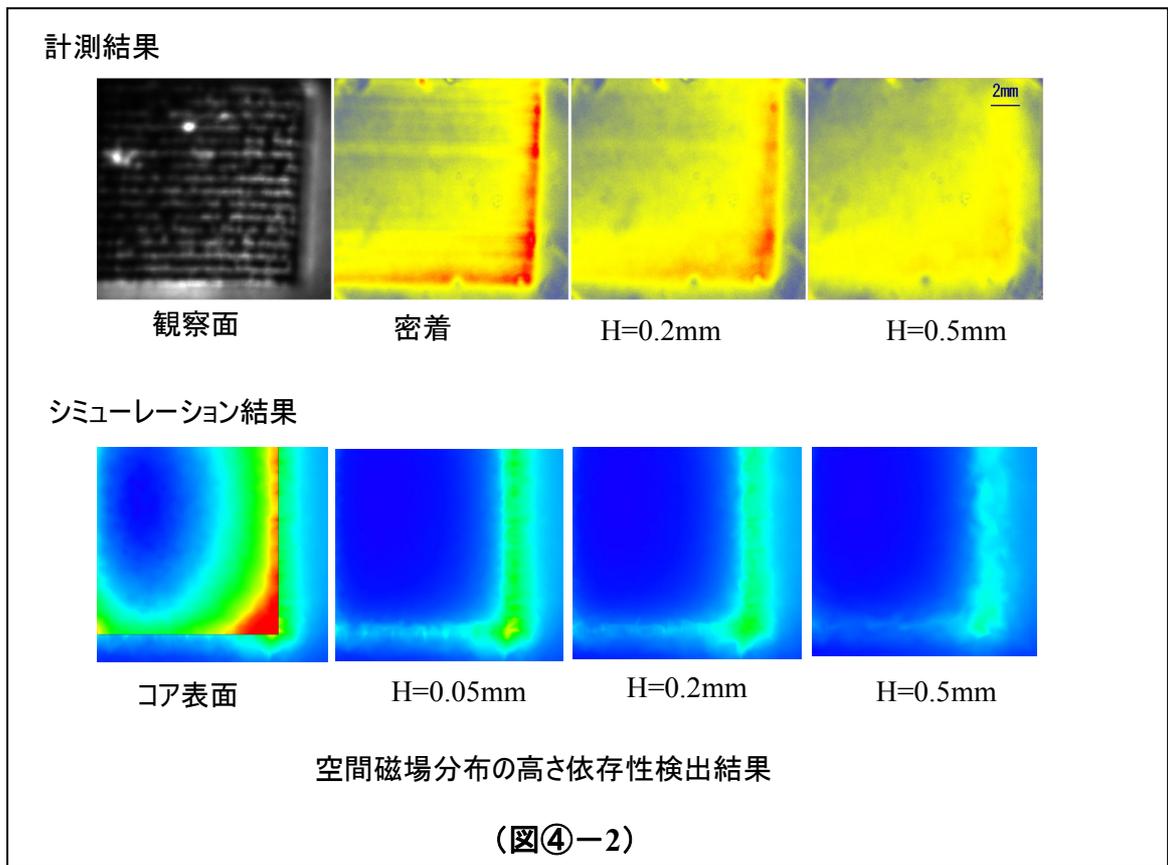
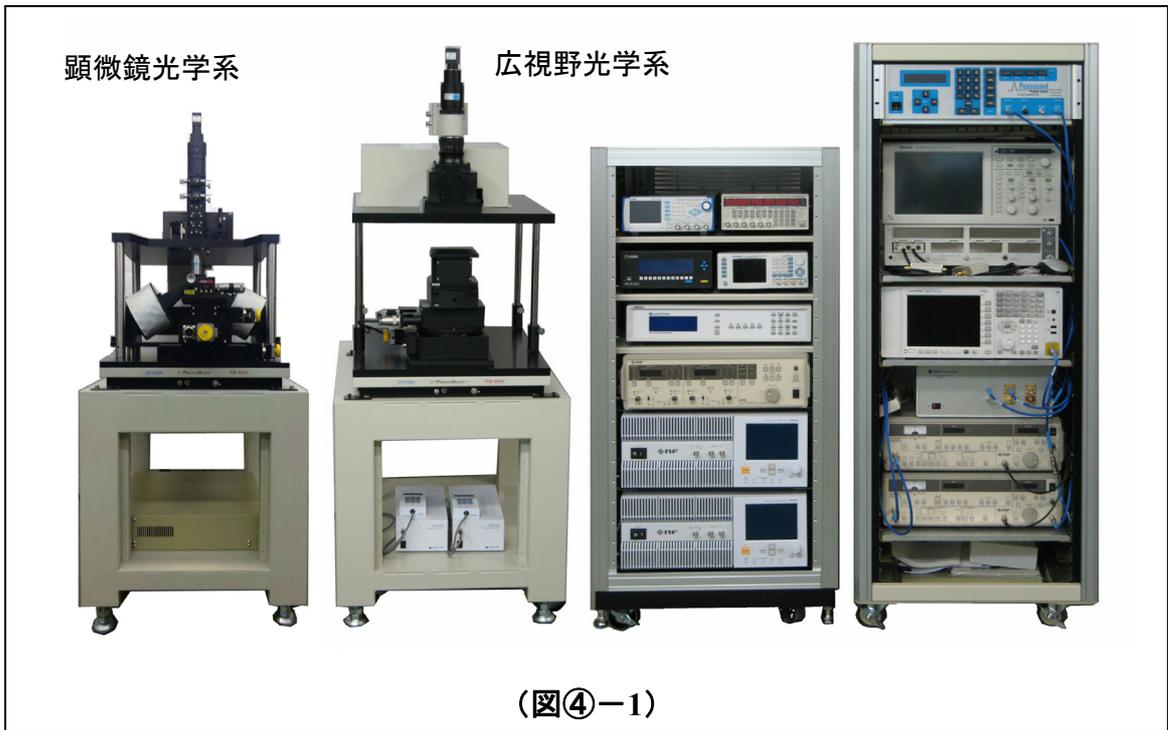
密着状態の計測結果では筋状の分布が見られているが、これはカットコアの端面の高さがそろっていなかった事に起因していると考えられる。また、コンピュータシミュレーション結果ではカットコアの角部分に磁場の集中が見られるが、計測結果では集中が小さいことがわかる。この相違はカットコアの端面の高さばらつきにより磁気転写膜が密着していない事に起因すると考え、高さ 50 μ m でのシミュレーションを行ったところ、計測した分布に近い事がわかった。高さ 0.2mm、0.5mm では計測結果とシミュレーション結果がほぼ一致しており、磁極から離れる事により急速に磁場が小さくなることがわかった。

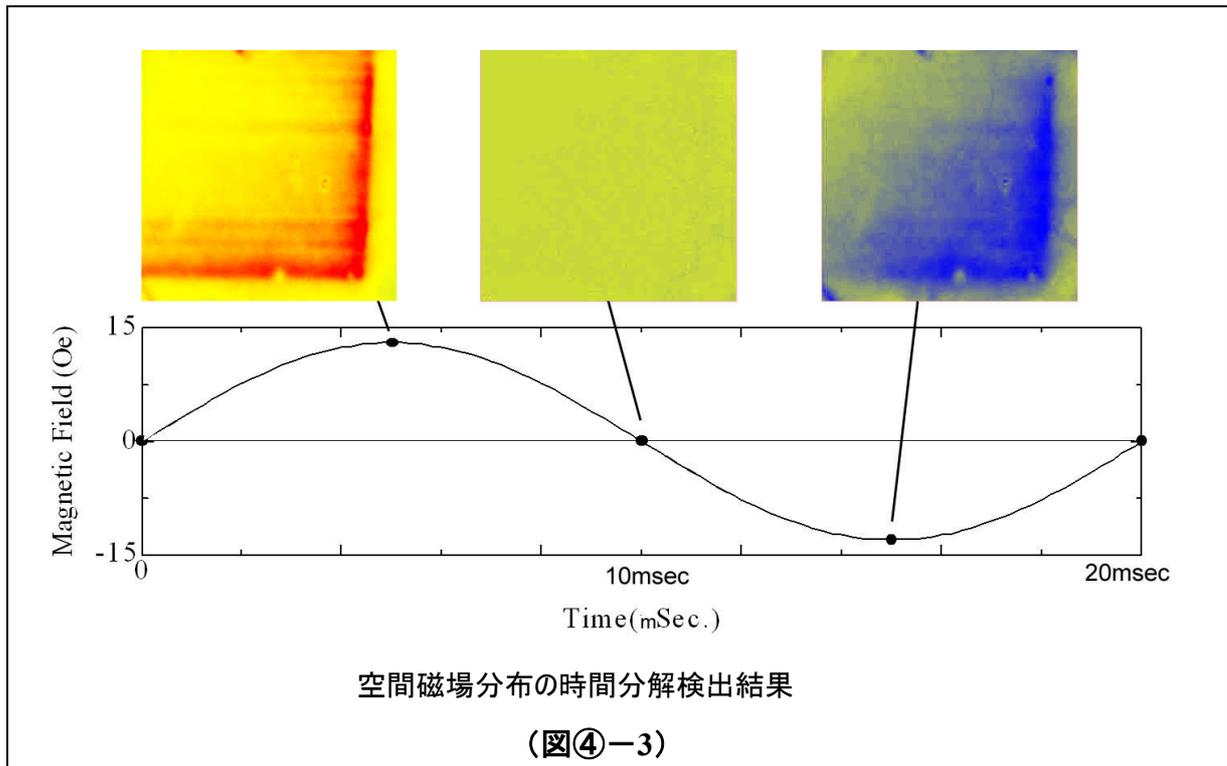
以上の結果より、空間磁場分布の一括検出が可能な事が実証された。

(c-2)空間磁場の時間分解一括検出

(c-1)と同じコアサンプルを用いて広視野装置による空間磁場の時間分解一括検出を行った。時間分解はイメージインテンシファイアと高速度カメラの組み合わせで、高速度カメラの撮影速度を 500 フレーム/秒に設定し行った。

結果を(図④-3)に示す。上段の画像のように本来は白黒画像で明るさが磁場の大きさに比例している。これをわかりやすくするため、擬似カラー化したものが下段の画像である。時間分解検出が可能な事が検証された。





第3章 全体統括

本研究開発において、当初目標に掲げた研究開発項目について、ほぼ目標を達成することが出来た。以下に研究開発項目当初目標、達成度合いを記す。

サブテーマ①のまとめ

(a) 平行光学系と集光光学系切替機構の設計及び試作

平行光学系と集光光学系という、相反する光学系を両立させるため、集光光学系を基本とし、レンズの挿入抜去により平行光学系に切替る切り替え機構を開発するとともに、レンズ系の最適化を行うことにより専用光学系を設計、試作を行った。

(b) 広い視野における磁区構造の観察を実現する光学系の開発

視野が 10mm 角程度必要な比較的大きな磁区構造(たとえば方向性電磁鋼板の磁区)を観察できる光学系を設計、試作した。

以上サブテーマ①に関して研究開発目標をほぼ達成した。

サブテーマ②のまとめ

パルスレーザー光源の装置化および性能評価を行い、性能を満足している事を確認した。これにより汎用の短パルス発振レーザー光源として単体での製品化が可能になった。

サブテーマ③のまとめ

屈折率分布を有する透明な樹脂製回転円盤による干渉性の抑制は十分な効果があることを確認し、インコヒーレント化手段として採用した。

以上本サブテーマに関して当初の目的を達成したので終了とした。

サブテーマ④のまとめ

(a)空間磁場・磁化過程可視化装置実験機の試作を完了した。川下ユーザからの mm オーダーの磁化、空間磁場検出に対応するため広視野測定装置の実験機の試作を行い完成させた。本研究で組み立てた実験機の外観は(図④-1)のようになった。

(b)有機金属溶液を用いた磁気転写膜の作成実験を平成 22 年度に引き続き行った。成膜条件の変更と成膜環境の整備により実用可能な磁気転写膜の作成に成功した。

(c)磁気転写法による磁気デバイスサンプルの空間磁場の検出と可視化の実現を目指して下記(c-1)～(c-2)の実験を行った。

(c-1)空間における磁場の強度分布の検出実験を行った。小型電動機の固定子に用いられている電磁鋼板を積層した材料の、断面部からの高さ方向の磁場を可視化する実験を行った結果コンピュータシミュレーションと一致した。

(c-2)ストロボ法により空間磁場の動的挙動を検出する実験を行った。結果は平成 22 年度に実施したリアルタイム検出による結果とよく一致したことから、空間磁場の強度分布、及び時間変化を磁気転写法により一括検出するための基本技術が確立されたといえる。

以下に完成させた実験評価装置の性能を示す。

	微小領域試作装置	広視野試作装置
空間分解能	1 μ m	0.1mm
時間分解能	500psec	10 μ sec
計測範囲	100 \times 70 μ m \sim	14 \times 10.5mm
最大検出磁場	1000Oe	1000Oe

以上サブテーマ④に関して研究開発目標をほぼ達成した。

MEMO

- (1) 磁気光学効果
物質の磁氣的性質が光に及ぼす偏り(偏光)、ファラデー効果、カー効果等がある。
- (2) インコヒーレント化
可干渉性(コヒーレンス)の高いレーザ光の干渉性を抑制すること。
- (3) スペckルノイズ
レーザ光が空間を伝搬する際にその可干渉性に起因して生じる雑音。
- (4) 磁心材料(カットコア)
電気エネルギーと磁気エネルギーの変換効率が高い鋼材料。
- (5) ガーネット膜
ガーネット構造を有する結晶薄膜。磁気分野では Bi:YIG 膜が代表的であり磁気光学定数が大きいことが知られている。
- (6) 磁気転写膜
磁気転写膜とは、磁場情報を他の方法で検出可能とするための薄膜を言う。
本研究では上記のガーネット膜を指し、磁場情報を光のファラデー回転に変化するために用いる。
- (7) 走査法
対象面を走査しながら検出情報を収集する方法。
- (8) ストロボ法
動いている事象に対して短時間の照明光を規則的に照射して事象の時間変化を鮮明に補足する方法。
- (9) 方向性電磁鋼板
鋼板の一方向的な方向のみに磁化しやすくなるようにした鋼板である。結晶を圧延方向に一方向的に整列させるように調整して作成する。主に変圧器に使われる。これに対して鋼板の特定の方向に偏って磁化しないようにした鋼板。結晶軸の方向がランダムになるように調整して作成した無方向性鋼板等材料もある。主にモーターの鉄芯や発電機に使われる。
- (10) Kerr 回転
磁気光学効果検出において磁性材料が磁化した状態と磁化していない状態で異なる直線偏光の振動方向の回転。
- (11) SUL 単層膜
垂直磁気記録ハードディスクの記録層の下に成膜されている軟磁性膜。
- (12) ファラデーガラス
磁気光学効果の一つであるファラデー効果が特に大きなガラス。
- (13) 偏光プリズム

自然光から直線偏光を取り出す際に用いられるプリズム。

(14) 波長板

偏光の2つの振動方向の両方または一方の位相を変化させるための光学素子

(15) 可干渉性

2つの波が干渉できる性質、波長と位相が一定であることが必要。

(16) パーマロイ薄膜

鉄とニッケルの合金を成膜した磁性薄膜。

(17) 飽和磁界

磁性体が完全に磁化してそれ以上磁化せず磁束も増大しない状態における磁界の値。