

チャネルド分光偏光測定

岡 和 彦

Channeled Spectropolarimetry

Kazuhiko OKA

Channeled spectropolarimetry is a snapshot method to measure the spectrally-resolved state of polarization (SOP) of light. This article reviews the basics and the recent developments of this method. Two high-order retarders possessing strong dispersions are utilized with this method so that the SOP can be measured without using mechanical or active components for the polarization control. The method has advantageous features that four wavenumber-dependent Stokes parameters can be determined at once from a channeled spectrum and that it has a simple and passive configuration suited for the miniaturization of the sensing head. Error sources of this method have been studied extensively since its invention, and accordingly several techniques to reduce the major errors have been developed. Prototypes for various applications, such as the ellipsometry, have been fabricated. Additionally, its principle has been expanded for the spectroscopic Mueller matrix measurement and the snapshot imaging polarimetry.

Key words: spectroscopic polarimetry, channeled spectrum, ellipsometry, snapshot measurement, imaging polarimetry

偏光計測は長い歴史をもつ光計測技術であるが、近年ますますその重要度が増しており、研究者人口も論文数もさらに増加している¹⁾。たとえば、光学や光エレクトロニクスなどのさまざまな分野において、機器の性能の飛躍的な向上に伴って、偏光についての精密な検出や制御が重要となっている。また、いわゆるバイオやナノなどをキーワードにもつ偏光計測の新たな応用分野も次々と出現している。さらには、放射状偏光など特異な性質をもつさまざまな偏光の生成が可能となり、これらの制御や応用に偏光計測が必要となっている。このように偏光計測は、その応用分野の拡大にあわせて、ますます活発な研究開発が続いている。

ところで、このように増加する偏光計測の研究であるが、その多くは回転移相子法や偏光変調法といった、従来からのスタンダードな計測原理に基づくものであった。しかしながら、応用分野の拡大に呼応して、まったく新しい原理に基づく偏光計測法も、近年いくつか考案されている。そのひとつにチャネルド分光偏光計測法がある^{2,3)}。高次移

相子の強い波長分散を利用するこの分光偏光計測法は、回転移相子や光弾性変調器などの機械的ないし能動的な偏光制御素子が一切不要であるという特徴をもつ。さらに、1回のスペクトル取得で4つのストークスパラメータの波長分布を同時かつ独立に決定する、いわゆるスナップショット分光偏光計測が可能である。筆者らがチャネルド分光偏光計測法を1998年に発表してから今日に至るまで、この計測法に関する研究がいくつかの研究機関で精力的に行われてきた。本稿では、この計測法の基本原理を説明するとともに、応用に向けた展開についていくつかの研究を紹介する。さらに、この原理の撮像偏光計測への拡張、すなわち偏光状態の二次元空間分布スナップショット測定についても述べる。

1. チャネルド分光偏光計測法の基本原理

1.1 偏光情報の周波数多重化

チャネルド分光偏光計の具体的な構成とその原理について説明する前に、偏光制御素子を用いない分光偏光計測を

いかにして可能としたか、その基本的な考え方を述べる。

通常の偏光計測において回転移相子などの偏光制御素子が必要な理由は、同時に求めるべき被測量が複数存在することにある。一般に光の偏光状態は、互いに独立な4つの実数パラメータの組によって記述される。このパラメータの組として、ストークスパラメータ S_0, S_1, S_2, S_3 がよく用いられる。あるいは、「完全偏光成分の偏光楕円の楕円率角 ε と方位角 θ 、偏光度 P 、および光強度 I 」の組み合わせなども用いることができる。これに対して、光計測においてわれわれが直接測定できる物理量は光強度のみである。これは自由度1の光強度から自由度4の偏光状態を求めねばならないことを意味し、このままでは逆問題の方程式の数が足りない。通常の偏光計測では、この問題を回避するために偏光制御素子を用いてさまざまな条件で光強度測定を繰り返し、方程式の数を増やしている。なお、偏光状態の波長分布を求める分光偏光計測では、各波長ごとの光強度、すなわちスペクトルを取得すればよい。このような従来の偏光計測法においては、偏光制御素子の性能が計測系全体の特性を左右する。このため偏光制御素子の性能向上のための研究が数多くなされてきた。しかし一方で、もし偏光制御素子を用いないで分光偏光計測が可能となれば、その素子による性能の制約を受けずにすむ。

ところで、時間軸に沿って条件を変えながら測定を繰り返すこのような情報取得は、通信工学における「時分割多重」の考え方と類似であるといえる。このアナロジーで考えると、通信工学で使われている他の多重化方法も、偏光計測に利用できる可能性がある。実際、「空間分割多重」を利用した偏光計測法として、波面分割法や振幅分割法が開発されてきた。特に分光偏光計測においては、Krishnan, Azzam らが回折格子の各次数ごとの偏光特性の違いを利用し、振幅分割と分光をひとつの回折格子で行う G-DOAP⁴⁾ を発表している。ただし、この方法では、特殊かつ大きな分光光学系を用意することが必要となる。

これに対して筆者らは、第3のアプローチである「周波数分割多重」を利用して、偏光制御素子を用いない分光偏光計測法を発明した^{2,3)}。後にチャンネル分光偏光計測法と名づけられたこの方法では、取得されるスペクトルに擬似正弦的に振動する複数のキャリア成分を重畳させることにより、4つのストークスパラメータの波長分布のスナップショット測定を実現する。この際、キャリア成分を発生させるために、筆者らは強い波長分散をもつ高次の複屈折移相子を利用した。高次移相子は、一般的な移相子である波長板などとは異なり、互いに直交する偏光成分の間の位相差(リタデーション)が 2π を大きく超えるように

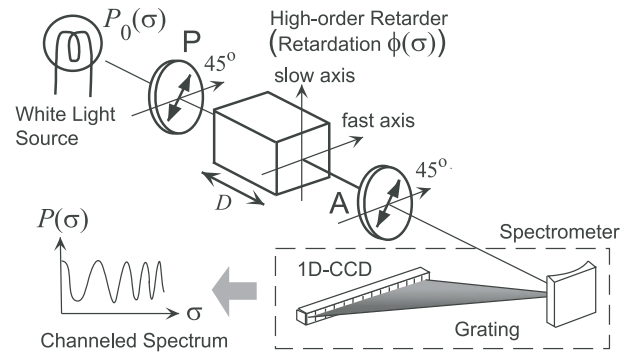


図1 高次移相子による多色の偏光干渉。

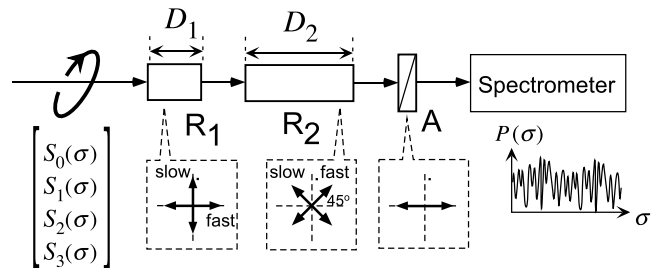


図2 チャンネル分光偏光計の基本構成。

設計されている。波長 λ の逆数で定義される波数 σ を用いると、厚さ D 、複屈折 $B(\sigma)$ の移相子のリタデーションは、

$$\phi(\sigma) = 2\pi B(\sigma) D \sigma = 2\pi L \sigma + \Phi(\sigma) \quad (1)$$

と書ける。ここで L は中心波数における傾きであり、 $\Phi(\sigma)$ は非線形項と定数の和を示す。高次移相子は厚さ D が大きいため、そのリタデーション ϕ は波数 σ に対してほぼ線形にかつ大幅に変動することとなる。たとえば図1のように高次移相子を偏光子 P と検光子 A で挟んで直交偏光成分間で偏光干渉を起こさせ、検光子透過光のスペクトルを観測すると、波数軸に対してほぼ正弦的に変調されたスペクトルが得られる。このようなスペクトルは一般にチャンネルドスペクトルとよばれる。次節で述べるように、この高次移相子を2つ組み合わせて複数のキャリアを発生させればスナップショット分光偏光計測が実現できるのである。

1.2 チャンネル分光偏光計の構成とその動作原理

チャンネル分光偏光計の基本構成を図2に示す。被測定光は、厚さの異なる2つの高次移相子 R_1 と R_2 および1つの検光子 A を順に透過し、分光器に入射する。上で述べたように、2つの高次移相子のリタデーション $\phi_1(\sigma)$ と $\phi_2(\sigma)$ は波数に強く依存するため、分光器で得られるスペクトルは細かく振動する。いま、被測定光のストークスパラメー

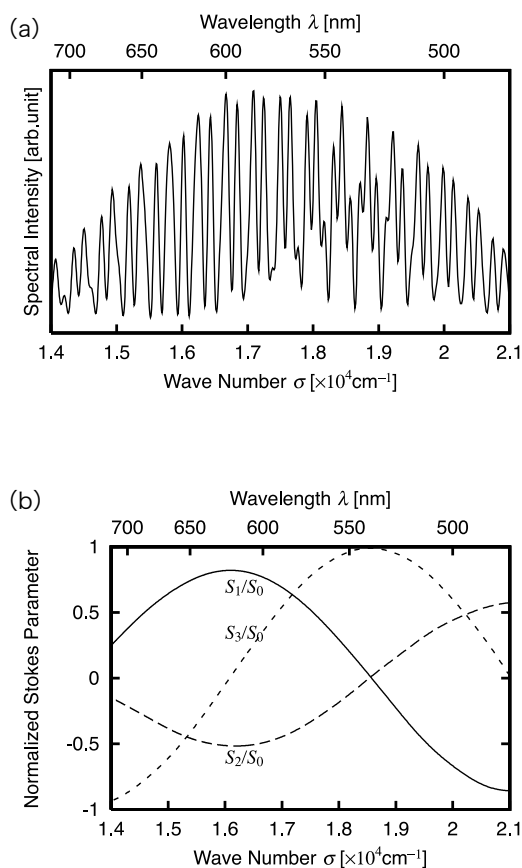


図3 チャネル分光偏光計の測定例。(a) チャネルスペクトル, (b) 規格化ストークスパラメーター。

ターを $S_0(\sigma)$, $S_1(\sigma)$, $S_2(\sigma)$, $S_3(\sigma)$ とすると, 得られるスペクトルは

$$\begin{aligned}
 P(\sigma) = & \frac{1}{2} S_0(\sigma) + \frac{1}{2} S_1(\sigma) \cos[\phi_2(\sigma)] \\
 & + \frac{1}{4} |S_{23}(\sigma)| \cos[\phi_2(\sigma) - \phi_1(\sigma) + \arg\{S_{23}(\sigma)\}] \\
 & - \frac{1}{4} |S_{23}(\sigma)| \cos[\phi_2(\sigma) + \phi_1(\sigma) - \arg\{S_{23}(\sigma)\}]
 \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。ただし $S_{23}(\sigma) = S_2(\sigma) + iS_3(\sigma)$ であり, \arg は複素数の偏角を取る演算子である。式 (1) と (2) からわかるように, このスペクトルには, 1つの低周波成分と異なる周期で振動する3つの擬正弦的なキャリア成分が含まれる。そしておのおのの成分には, $S_0(\sigma)$, $S_1(\sigma)$, ないし $S_{23}(\sigma)$ のいずれかが変調されている。各成分を周波数フィルタリングにより取り出し, その振幅と位相を復調すれば, 4つのストークスパラメーターの波長分布を同時かつ独立に求めることができる。チャネル分光偏光計による測定例を図3に示す。ハロゲンランプを光源とし, 直線偏光子とバビネソレイユ補償子を順に透過した光を測定した。得られたチャネルスペクトルを (a)

に, 復調された規格化ストークスパラメーターを (b) に示す。

この計測法では, 図2からわかるように機械的ないし能動的な偏光制御素子が不要である。さらに, 1回のスペクトル測定で4つのストークスパラメーターの波長分布を一度に求めるスナップショット分光偏光計測が可能である。さらに, 光学系が簡単であるため, 製作が容易であるという利点ももっている。

2. チャネル分光偏光計測法の展開

2.1 誤差低減

発明当初のチャネル分光偏光計は誤差が大きく, また安定度や再現性も不十分であった。しかしその後, 誤差解析が精力的に行われ, さまざまな誤差原因が発見されるとともに, それらの除去や低減のための技術も確立された。

偏光制御素子が不要なチャネル分光偏光計測法では, 当然ながら偏光制御 (切り替え) の不完全さによる誤差は発生しない。しかしながら, 代わりに導入した高次移相子にも固有の不完全さがあり, それによって引き起こされる誤差がある。そのひとつが温度外乱による誤差である。高次移相子は, 波長板などの0次移相子に比べてかなり厚いため, そのリタデーションは温度に強く依存する。このリタデーションは通常は測定前に較正しておくため, 測定中にリタデーションが変動すると復調されたストークスパラメーターがずれることとなる。筆者らはこの問題を解決するために自己較正法を考案した⁵⁾。この方法では, 式 (2) のチャネルスペクトル $P(\sigma)$ に含まれる情報の冗長性を利用して, ストークスパラメーターの復調と同時に移相子のリタデーション $\phi_1(\sigma)$ と $\phi_2(\sigma)$ の再較正を行う。いくつかの計算式が考えられるが, 一例として,

$$\phi_2(\sigma) = \frac{1}{2} \arg[16F_2^2(\sigma) - 64F_-(\sigma)F_+(\sigma)] \quad (3a)$$

$$\phi_1(\sigma) = \frac{D_1}{D_2} \phi_2(\sigma) \quad (3b)$$

がある。ここで $F_2(\sigma)$, $F_-(\sigma)$, $F_+(\sigma)$ は, 式 (2) に含まれる3つのキャリア成分の複素振幅であり, D_1 と D_2 は高次移相子 R_1 と R_2 のそれぞれの厚さである。なお, 式 (3a) の大括弧の中の成分の絶対値は, 被測定光の完全偏光成分の強度の自乗である $S_1^2(\sigma) + S_2^2(\sigma) + S_3^2(\sigma)$ に一致する。これゆえ, 被測定光が無偏光でない限り, 式 (3a) と (3b) による $\phi_1(\sigma)$ と $\phi_2(\sigma)$ の再較正が可能である。自己較正法が導入されたチャネル分光偏光計は, 被測定光の偏光状態のみならず, 測定系のパラメーターである高次

移相子のリタレーションも1つのチャンネルスペクトルからすべて一度に求めることができるという特徴をもつ。すなわち、チャンネル分光偏光計測法の利点であるスナップショット計測の利点を損なうことなく、温度外乱の補正もできるのである。

チャンネル分光偏光計測法の別の誤差原因に、試料による光線や波面の揺らぎがある。高次移相子のリタレーションは、透過する光の光線方向や波面などに強く依存する。このため、試料の有無でこれらが変わると、大きな誤差が生じることになる。この問題は、高次移相子の位置を検出系から照明系に移動することで解決できる⁶⁾。なぜなら、試料より前に配置された高次移相子は、試料によって生じた光線方向や波面の揺らぎの影響を受けないからである。なお理論解析により、特に相反性が満たされる試料については、移相子移動後の系においても移動前の系と同じ情報を測定できることが証明された。

ほかにも、分光器の波長再現性や高次移相子のフレネル反射の偏光依存性などさまざまな誤差要因が発見され、併せてそれらの除去・低減法が考案されてきた^{7,8)}。これらの研究成果により、誤差を楕円率角および方位角にしておおよそ0.1 deg程度まで低減できるようになった。これは、偏光計測の多くの用途に用いるレベルである。

2.2 応用を目指した展開

上述のように、チャンネル分光偏光計測法には、従来法とは異なるさまざまな特徴がある。これらの特徴を生かすため、応用を目指した計測系の試作や機能拡張が研究されている。

チャンネル分光偏光計測法の大きな利点のひとつは、計測装置の小型化が容易な点である。これは、偏光検出系がシンプルで、かつモーターなどの駆動装置を含まないことによる。なお、先に高次移相子は厚いと書いたが、これは波長板などの0次移相子に比較してのことであり、特に高複屈折媒質を利用すれば装置の小型化に支障はない。小型化の例として、図4のような鉛筆サイズのセンシングヘッドが試作されている⁹⁾。このヘッドには高次移相子と検光子からなる偏光検出光学系と集光レンズが含まれており、光ファイバーを介して小型の分光器に接続される。これだけで図2に示される分光偏光計を実現できる。さらに、この特徴を生かし、手のひらサイズの分光エリプソメーター⁸⁾がオムロンの岡部らによって試作されている。図5にその構成と写真を示す。この系については、さまざまな誤差対策が施されており、3 nm~4000 nmのSiO₂薄膜の膜厚測定において0.11 nmの精度および安定度が得られている。

チャンネル分光偏光計測法には、測定時間の短縮が容易



図4 鉛筆サイズの分光偏光計測センシングヘッド。

であるという利点もある。偏光制御素子が不要なため、分光器の応答時間だけで測定時間が決まる。ただし、微細構造をもつチャンネルスペクトルの測定には、より多素子のマルチチャンネル型分光器が必要なため、回転移相子法などに比べて絶対的に応答速度が速いとはいえない。しかしそれでも偏光制御素子を高速に制御する必要がないため、応答時間の短縮は容易である。ちなみに、図4と図5の小型分光偏光計の応答時間は、いずれも20 ms程度と、分光偏光計としてはかなり短い。

1回のスペクトル測定で複数の偏光パラメーターが測定できるチャンネル分光偏光計測法は、光学素子などの偏光特性の測定や検査に有効であり、複屈折分散測定などへの応用が試みられている。さらに、光学系の構成を変えて旋光性の分散の測定や、さらにはフルミューラー行列測定への拡張もなされている。ミューラー行列とは、線形な光学素子の偏光特性を完全に記述する物理量であり、具体的には素子の入射時と射出時のそれぞれのストークスパラメーターを関係づける4×4の行列である。4つの高次移相子を用いて1ショット（スナップショット）で分光ミューラー行列をすべて求められる光学系として、図6(a)の系がアリゾナ大学のHagenらによって提案されている¹⁰⁾。ただしこの系は、チャンネルスペクトルに含まれるキャリア数が多いため、さらに高分解能な分光器が必要となり、実装には制約が大きい。そこでこの妥協案として、4回のチャンネルスペクトル測定で16個のミューラー行列要素すべてが測定可能な光学系として、図6(b)¹¹⁾および(c)¹²⁾の構成が、それぞれ大谷らと筆者らによって考案されている。(b)の系では、試料前後の高次移相子R₁とR₂のそれぞれの方位を2通りに変えて計4個のチャンネルスペクトルを得る。一方(c)の系では、固定された高次移相子R₁とR₂を試料の前に置き、試料の後の補償子C(0次移相子)の方位を4通りに変えてチャンネルスペクトルを取得する。いずれの系においても、実験により4ショットでのフルミューラー行列の分光測定が可能であることが実証されている。なお、

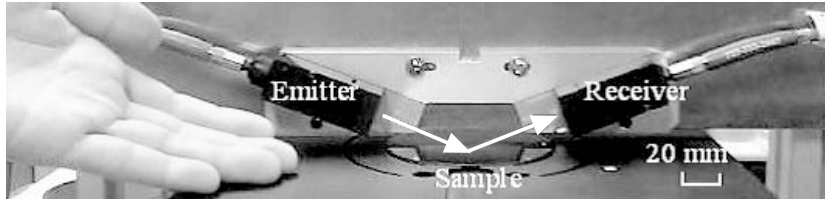
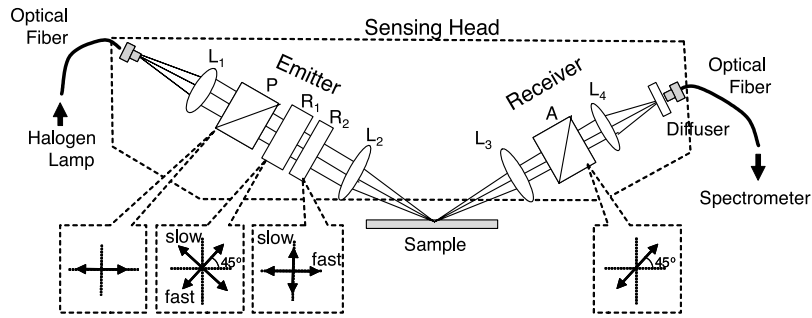


図5 手のひらサイズの分光エリプソメーター。

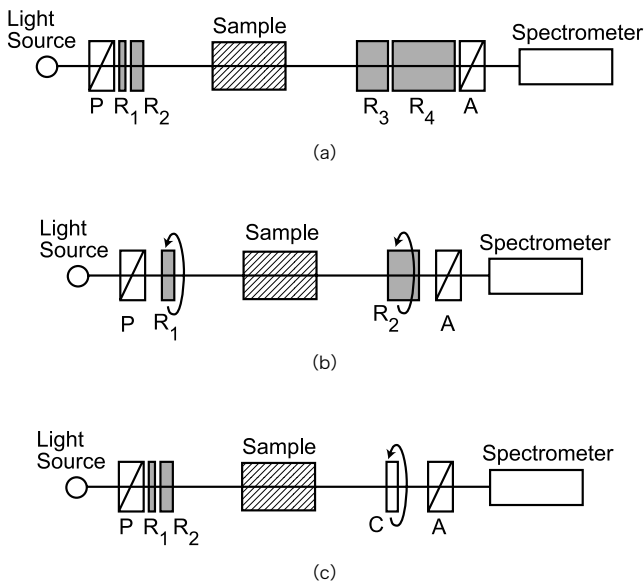


図6 チャンネル分光偏光計測に基づくフルミューラー行列分光偏光計。(a) 1ショットフルミューラー行列分光偏光計, (b) 4ショットフルミューラー行列分光偏光計 (その1), (c) 4ショットフルミューラー行列分光偏光計 (その2)。

(b) の系については、本号の大谷氏の解説も参照されたい。
 チャンネル分光偏光計測法の応用としては、これまでに述べた分光エリプソメトリーや光学素子の検査のほかにも、リモートセンシング^{13,14)}、生体光学¹⁵⁾、超高速光学¹⁶⁾などさまざまな分野で研究が進められている。特にリモートセンシングについては、三次元分光器との組み合わせや White Light Continuum の利用などが検討されている。

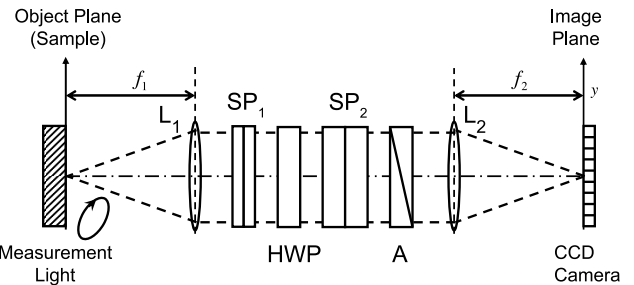


図7 2枚のサバル板を用いたスナップショット撮像偏光計。

3. 撮像偏光計への拡張

先に述べたように、チャンネル分光偏光計測法とは、「周波数多重」の考え方に基づいた偏光状態のスペクトル分布測定法である。同様の考え方を撮像偏光計測に導入すれば、今度は偏光状態の二次元空間分布計測が可能となる。この考え方に基づくスナップショット撮像偏光計がいくつか考案されている。

そのひとつとして、2枚のサバル板を用いた撮像偏光計¹⁷⁾がある。その構成を図7に示す。この光学系は基本的に二重回折結像系をなしており、サンプルの射出面が CCD 上に結像されている。ここで2枚のレンズの間に、サバル板 SP₁、二分の一波長板 HWP、サバル板 SP₂、および検光子 A からなる偏光光学系が挿入されている。サバル板は透過光を光軸に垂直にシフトする働きがあり、そのシフト方向は直交する固有直線偏光によって異なる。このため CCD で得られるサンプルの像には、周期や方向の異なる3種類の干渉縞が重畳されることとなる。この干渉縞をキャリアとしてチャンネル分光偏光計測と同様

の信号処理を施せば、撮像偏光計測が実現できる。この撮像偏光計の特徴は、チャンネル分光偏光計測法と同様に、機械的ないし能動的な偏光制御素子が不要なこと、およびスナップショットで4つのストークスパラメーターの二次元分布が測定できることである。アリゾナ大学のSchwiegerlingらのグループでは、この原理を眼底カメラに組み込み、眼底の偏光分布測定を行っている¹⁸⁾。緑内障などの病変に応じた特徴的な偏光分布を1回の干渉縞取得で測定できることが示されている。

チャンネル分光偏光計測法の原理とその展開について述べた。発明当初の問題であった大きな誤差はかなり低減され、多くの用途に十分利用可能なレベルにほぼ達している。さらに機能を増強するための研究も進められている。ただし、本計測法の応用は端緒についたばかりである。今後、本法の特徴を生かした応用が広がっていくことが期待される。

文 献

- 1) H. Arwin, U. Beck and M. Schubert: "Preface: phys. stat. sol. (c) 5/5," *Phys. Stat. Sol. (c)*, **5** (2008) 1000-1002.
- 2) 加藤貴之, 岡 和彦, 田中 哲, 大塚喜弘: "周波数領域干渉法に基づく偏光のスペクトル分布測定", 第34回応用物理学会北海道支部学術講演会講演予稿集 (応用物理学会北海道支部, 札幌, 1998) p. 41.
- 3) K. Oka and T. Kato: "Spectroscopic polarimetry with a channelled spectrum," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1475-1477.
- 4) S. Krishnan, S. Hampton, J. Rix, B. Taylor and R. M. A. Azzam: "Spectral polarization measurements by use of the grating division-of-amplitude photopolarimeter," *Appl. Opt.*, **42** (2003) 1216-1227.
- 5) A. Taniguchi, K. Oka, H. Okabe and M. Hayakawa: "Stabilization of the channelled spectropolarimeter by self calibration," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 3279-3281.
- 6) H. Okabe, M. Hayakawa, H. Naito, A. Taniguchi and K. Oka: "Spectroscopic polarimetry using channelled spectroscopic polarization state generator (CSPSG)," *Opt. Express*, **15** (2007) 3093-3109.
- 7) A. Taniguchi, H. Okabe, H. Naito, N. Nakatsuka and K. Oka: "Stabilized channelled spectropolarimeter using integrated calcite prisms," *Proc. SPIE*, **5888** (2005) 588811.
- 8) H. Okabe, M. Hayakawa, J. Matoba, H. Naito and K. Oka: "Error-reduced channelled spectroscopic ellipsometer with palm-size sensing head," *Rev. Sci. Instrum.*, **80** (2009) 083104.
- 9) A. Taniguchi, K. Oka, H. Okabe, H. Naito and N. Nakatsuka: "Miniaturized channelled spectropolarimeter," *Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies* (Optical Society of America, Washington, DC, 2006) p. CTuV5.
- 10) N. Hagen, K. Oka and E. L. Dereniak: "Snapshot Mueller matrix spectropolarimeter," *Opt. Lett.*, **32** (2007) 2100-2102.
- 11) Y. Otani, T. Wakayama, K. Oka and N. Umeda: "Spectroscopic Mueller matrix polarimeter using four-channelled spectra," *Opt. Commun.*, **281** (2008) 5725-5730.
- 12) K. Oka, S. Endo, A. Taniguchi and H. Okabe: "Channelled spectroscopic polarization state generator (CSPSG) and its application to spectroscopic measurement of Mueller matrix," *Proc. SPIE*, **6682** (2007) 668203.
- 13) D. S. Sabatke, A. Locke, E. L. Dereniak, J. Garcia, T. Hamilton and R. W. McMillan: "Snapshot imaging spectropolarimeter," *Opt. Eng.*, **41** (2002) 1048-1054.
- 14) 染川智弘, 岡 和彦, 藤田雅之: "コヒーレント白色光を用いたチャンネル分光偏光計測", 第27回レーザーセンシングシンポジウム (LSS27) (レーザーダ研究会実行委員会, 東京, 2009) pp. 38-39.
- 15) E. Kim, D. Dave and T. E. Milner: "Fiber-optic spectral polarimeter using a broadband swept laser source," *Opt. Commun.*, **249** (2005) 351-356.
- 16) E. López-Lago and R. de la Fuente: "Measurement of the polarization dynamics of ultrashort pulses by using nonlinear phase modulation and channelled spectroscopic polarimetry," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **7** (2005) 400-403.
- 17) K. Oka and N. Saito: "Snapshot complete imaging polarimeter using Savart plates," *Proc. SPIE*, **6295** (2006) 629508.
- 18) E. DeHoog, H. Luo, K. Oka, E. Dereniak and J. Schwiegerling: "Snapshot polarimeter fundus camera," *Appl. Opt.*, **48** (2009) 1663-1667.

(2010年4月5日受理)