

Ulexite を用いたランダム光多重記録の実験と評価

石井 裕子¹, 入沢美沙子¹, 高山 佳久², 渡邊恵理子¹, 小館香椎子¹

¹日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

²宇宙航空研究開発機構

(2006年11月 8 日受理)

要 旨 ホログラフィック光メモリは大容量かつ高速アクセスが可能であり、次世代メモリとして盛んに研究されている。また、3次元ホログラムを暗号化して用いることで、複製が困難になることから、より安心・安全な情報記録法としても期待されている。記録情報の安全のためには、情報の記録再生を行う鍵の安全性も大切である。我々は、これらの要求に対して、これまでファイババンドルからのランダムな光波を用い、簡易で、コンパクトなランダムパターン光多重記録システムを提案し、有効性を実験的に確認してきている。さらに、提案しているシステムでは、全く同じランダム光波を作り出すのは難しいことを利用すると、この手法で記録したホログラムはセキュリティへの応用に適していると考えられる。そこで、情報を出し入れするための重要な鍵として、人工物で、同一の光学特性を持つ複製が可能であるこれまでのファイババンドルに代えて、身に着けて持ち運べ、より安全性を高められる自然石を記録・再生のキーとしての基礎特性の検討を加えている。

本論文では自然石の一例としてファイババンドルと類似特性をもつ Ulexite (組成: $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) に着目し、100枚の画像の多重記録と読み出し、再生画像の BER 評価、さらに Ulexite の再設置による記録画像の再現性を確認し、自然石が情報記録・再生におけるセキュリティキーとして使用できる可能性を見出す。

キーワード: ホログラフィック光多重記録, ランダムパターン, 自然石, Ulexite, 画像評価

1. はじめに

高度情報化社会の進展と共に、様々な分野で記録システムの大容量化、小型化、データ読み出しの高速化が求められており、次世代メモリの研究が盛んに行われている^{1, 2)}。ホログラフィック光メモリは3次元的にページデータで記録再生を行うことから、従来の2次元的に1bit ずつ記録再生を行う光ディスクに比べ、大容量で高速データが可能である。さらに、3次元的に記録されたホログラム情報は同時に暗号化を導入することが可能であることから、安心・安全な情報記録が期待できる。このような利点を持つホログラフィック光メモリは実用化に向けて様々な多重記録手法が研究されている。

我々がこれまで検討を行ってきているランダムパターン光多重記録方式は、ランダムな光波を用い、異なるラ

ンダムパターンには相関がないことを利用した独創的な多重記録方法である^{3, 4)}。この手法の特徴としては、第一に位相や偏光状態がランダムに分布している拡散光を用いているため、物体光と参照光の干渉において厳密な光軸合わせを必要としない。第二に他の多重記録手法との組み合わせを容易に行うことができる。第三にランダム波面により、光暗号化技術を適用できるという利点をもつ。

光暗号化とは、光のもつ振幅、位相、偏光、波長などの物理量を変調して、画像情報に対して並列処理を行う新しい暗号化技術である。ディフューザーなどの位相変調物体に画像を通すことで像をランダムに乱し、簡単に情報の暗号化が行うことができる。情報の暗号化・復号に関する提案は1995年に P. Refregier と B. Javidi⁵⁾ が行ってから、光暗号化とその認識・メモリシステムへの応用が盛んになってきている⁶⁾。暗号化には、原画像を暗号化する方法と参照光を暗号化する方法、その両方を暗号

化する方法がある。一般的にこのランダムな波面を作り出すデバイスとして、ディフューザーや、液晶空間光変調器、ファイババンドルなどが用いられ、ランダムパターンを情報の暗号化に応用させている例もあり、高いセキュリティの効果も報告されている^{7, 8)}。さらに2つのランダム位相マスクとその3次元位置、波長を組み合わせる原画像情報を暗号化し、体積型ホログラムを記録するセキュリティホログラムの研究などが行われており、ホログラフィック暗号化システムは様々なアプリケーションに向けた展開がなされている⁹⁾。

我々はこれまで参照光を暗号化する手法として、ランダムパターン生成素子にファイババンドルを用いたランダムパターン光多重記録システムの検討を行ってきた^{10, 11)}。本論文ではファイババンドルの代わりに自然石を用いることを提案する。ランダムパターン生成素子に自然石を用いることのメリットは、自然石は複製が困難であるため、情報を読み出す安全性の高い鍵になると考えられる。また、ランダム波面生成素子として安価であり、装飾品として身に着けることができるため、鍵と分からずに持ち運びが可能である。そのようなアプリケーションに適用するためには、システムから取り外し後の再設置精度が重要になる。この場合、装飾品として複雑に加工することによって形状が固定され、シフトゆらぎが軽減し、システムへの再設置がスムーズに行うことができると期待する。今回は、自然石の一例として、ファイババンドルと類似した構造をもつ自然石のUlexite (組成: $\text{NaCaB}_2\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) に着目し、Ulexiteによる100枚の画像の多重記録と読み出し、再生画像のBERによる画像評価、さらにファイババンドルとUlexiteの再設置による記録画像の再現性を確認について報告する。

2. Ulexiteを用いたランダムパターン光多重記録システム

2-1. ランダムパターン光多重記録システム

ランダムパターン光多重記録システムの実験光学系をFig. 1に示す。光源として波長514nmのAr Laser、記録媒体として、フォトリフラクティブ結晶の45°-cut $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ 結晶を用いる。Ulexiteから出射する拡散光が再生像の背景光となる影響を低減するために、物体光の光軸を直交させる。直交した物体光と参照光の光軸を含む平面内にC軸がある。参照光と物体光を直交させると、結晶C軸に対して光波の偏光状態が垂直な成分のみ干渉するため、常光線記録となる。

光源から出た光は偏光ビームスプリッター (PBS) によって2光波に分けられる。PBSの透過光は物体光として液晶空間光変調器 (SLM) に入射させる。PBSの反射光は参照光としてステッピングモーターに固定したラン

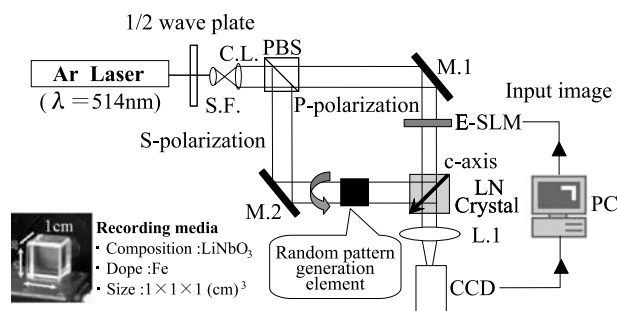


Fig. 1. Experimental setup. Recording media is LiNbO_3 . A movement of the Ulexite is shown in the inset.

PBS, polarizing beam splitter; M, mirror; SLM, spatial light modulator; L, lens.

ダムパターン生成素子に照射させる。そして、 LiNbO_3 結晶 (1 cm³) において物体光と参照光を干渉させる。再生像は、参照光のみを結晶に照射させることにより得られ、CCDカメラ上で撮像し、PC上に取得する。ランダムパターン生成素子をステッピングモーターを用いて回転させ、通過した参照光の位相と偏光状態を変化させて多重記録を行う。

2-2. Ulexiteを用いた多重記録実験

我々はすでに、ランダムパターン生成素子にファイババンドル (直径: 1 cm, ファイバ径: 50 μm, マルチモードファイバ数: 4 万本) を用いて検討を行い、良好な結果を得ている¹⁰⁻¹⁴⁾。本論文では、よりセキュリティを高めるために、Fig. 2 (a) に示す自然石であるUlexiteに着目し多重記録実験を行う。Ulexiteは平行に結晶が接合されていることから、ファイババンドルと同様の構造をもち、ランダム波面を生成することができる。Ulexiteは台形状 (上底: 1.0 cm, 下底: 2.0 cm, 高さ: 1.3 cm, 厚さ: 1.0 cm) のものを使用する。Ulexiteを中心軸に一方方向に回転させると、出射光波の位相と偏光状態のランダムパターンが変化し、多重記録を行うことができる。また、撮像したUlexiteとファイババンドルのスペックルパターンの観測から、Ulexiteから出射されるランダムパターンの細かさを確認した。

多重記録実験では、記録画像に1~100までの算用数字を用い、PCで作成した画像を液晶空間光変調器 (SLM) に投影する。物体光と参照光は、0.55 mW, 5.55 mWで、記録時間は、1枚当たり120 secで記録を行った。記録画像 (算用数字, 画像サイズ: 230×110 pixel) を1枚ずつSLMに表示し、記録条件 (物体光: 参照光を1:10) を一定とし分離角度0.2°で多重記録実験を行い、Fig. 3に多重記録の再生画像の結果を示すように鮮明な再生を確認できた¹⁵⁾。

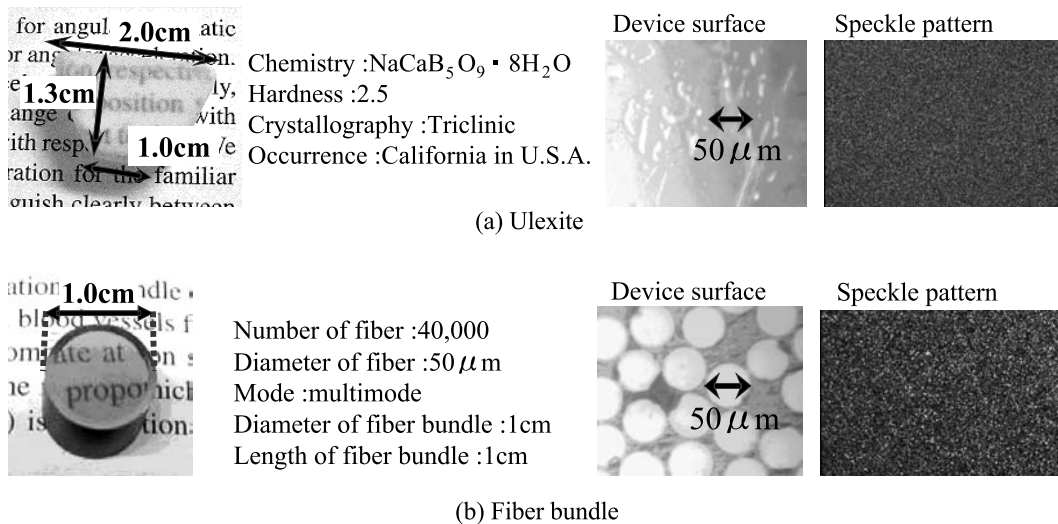


Fig. 2. (a) Ulexite and (b) Fiber bundle are random pattern generation element. The surface of the device is measured by (a) and the same (b) magnification. Speckle pattern of (a) is much finer than that of (b).

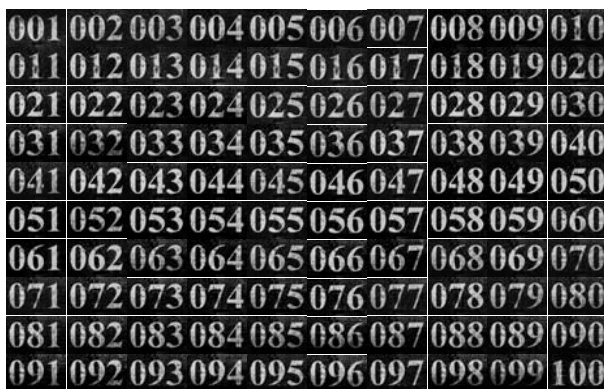


Fig. 3. Readout images of 100 multiplex recorded with the Ulexite.

3. BER による画像評価

Ulexite を用いたランダムパターン光多重記録による記録画像の再現性を確認するために、画像評価を行う。画像評価には SLM の 1 画素の再現性の度合を表す Bit Error Rate (BER) を指標とし、記録画像にはランダムドットの画像を用いる。

$$BER = \frac{\text{error bits}}{\text{all bits}}$$

Fig. 4 に示すように記録画像と再生画像において画素の比較を行い、再現されていない画素をエラー画素としてカウントする。それを全体の画素数で割り BER を算出する。画像評価を行うにあたり、本実験で使用した SLM と CCD の画素サイズの違いと再生画像の歪みに適応させる必要がある。そこで、3 × 3 画素に 1 つだけ

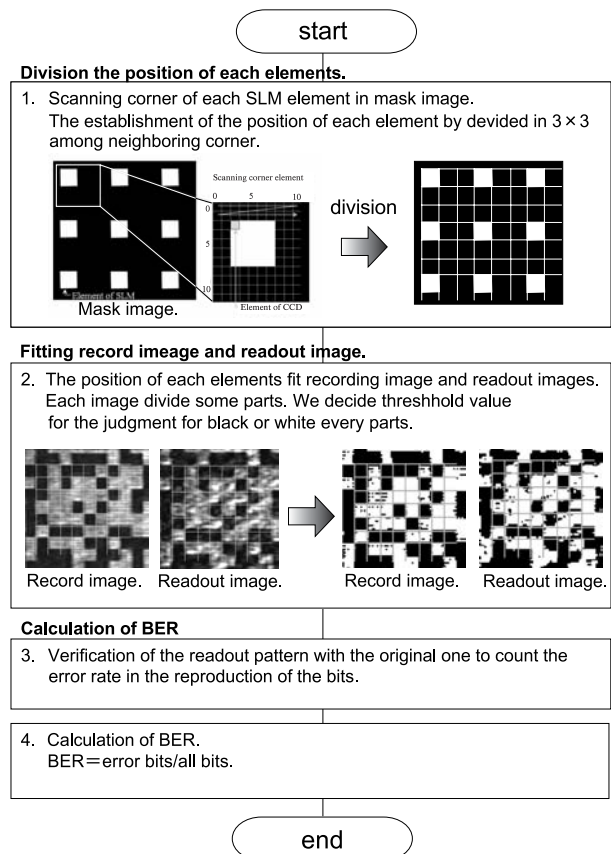


Fig. 4. Compensation processing of image evolution.

明ビットであるマスク画像を用いて各画素範囲を求めるマスク補正の処理を行う。また、ホログラム特有の再生画像の光量のむらに対応させるために、分割閾値法を用いる。それは画像を分割し、その領域ごとに最適な閾値

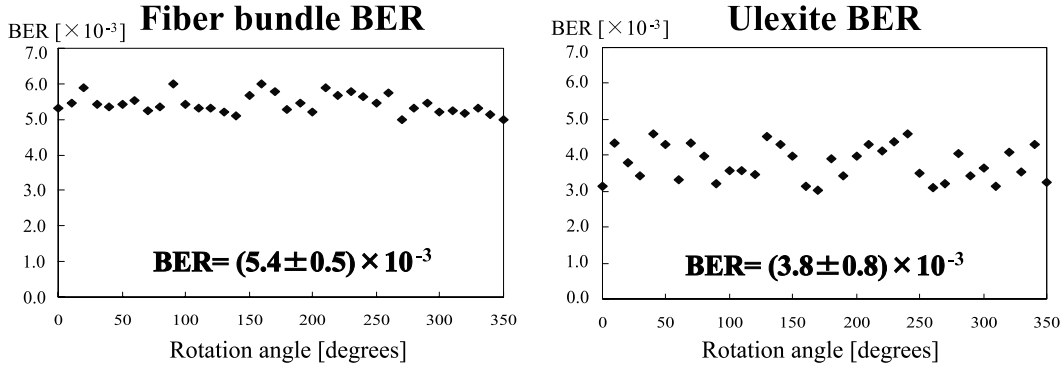


Fig. 5. Bit error rate calculation result.

を求める手法である¹⁶⁾。また、各デバイスを10度ずつ回転させ BER の分散についても検討する。

BER 算出結果を Fig. 5 に示す。ファイババンドルは $\text{BER} = (5.4 \pm 0.5) \times 10^{-3}$ 、Ulexite では $\text{BER} = (3.8 \pm 0.8) \times 10^{-3}$ の値を得た。一般的に映像信号の記録再生に問題ない範囲として、 $\text{BER} = 10^{-5}$ 以下が望ましいとされている。さらに誤り訂正符号を用いることにより、BER は改善され、通常より訂正可能な値であると考えられる¹⁸⁾。したがって、ホログラフィック光メモリシステムにおいて記録画像が再現されていることを確認し、今回の実験では Ulexite の方が忠実に画像を再現できた¹⁵⁻¹⁷⁾。

4. Ulexite のセキュリティキーとしての適用

ランダムパターン生成素子をセキュリティキーとして利用するためには、再設置による記録画像の再現性が必要である。これまで使用してきたランダムパターン生成素子であるファイババンドルと今回提案する Ulexite を用いて再設置の検討を行う。

4-1. ファイババンドルの再設置

ファイババンドルをシステム光学系に戻す精度を測定するために、位置・角度の変化による再生許容範囲を測定する。Fig. 6 に示すようにランダムパターン生成素子と記録媒体である結晶の関係に再設置の際、位置・角度に対して6軸がある。画像を1枚記録し、画像が再現されなくなるまで軸をシフトさせた結果 x 軸 0.4mm、y・z 軸 0.003mm、 $\theta \cdot \omega$ 軸 0.083° 、 ϕ 軸 0.015° となった。この画像再生許容範囲内にファイババンドルを再設置することができ、記録画像が再生される。

再び1枚の画像の記録を行い、この状態からファイババンドルを一度取り外し、再生可能範囲内に再設置をしたところ、Fig. 7 に示すような再生画像を得ることができた。従って、ファイババンドルは情報の出し入れを行うセキュリティキーとして用いることができると分かった。また、人工物であるファイババンドルは、全く同じ

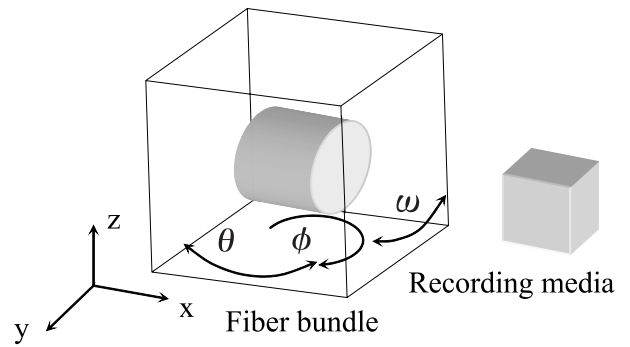


Fig. 6. The image reproduction tolerance to change of positions and angles. In six axes, x, y, and z axis change the positions and q, w, and f axis change the angles.

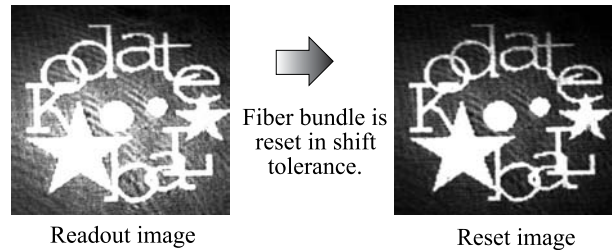


Fig. 7. Test on image reproducibility by resetted the fiber bundle.

構造を持つファイババンドルが作製可能であるため、複数の鍵が存在する。同時に、光学特性が同じ別のファイババンドルを用いることにより、情報を読み出せる可能性があることを意味する。

4-2. Ulexite の再設置

よりセキュリティを高めるために、複製が困難な自然石である Ulexite を用いる。ファイババンドルと同様の記録条件を用いて Ulexite の再設置による記録画像の再現性を検討する。Fig. 8 に結果を示すように、記録・再生時に全く同一の Ulexite を用いた場合、記録画像を再生することができた。また、記録時に用いた Ulexite

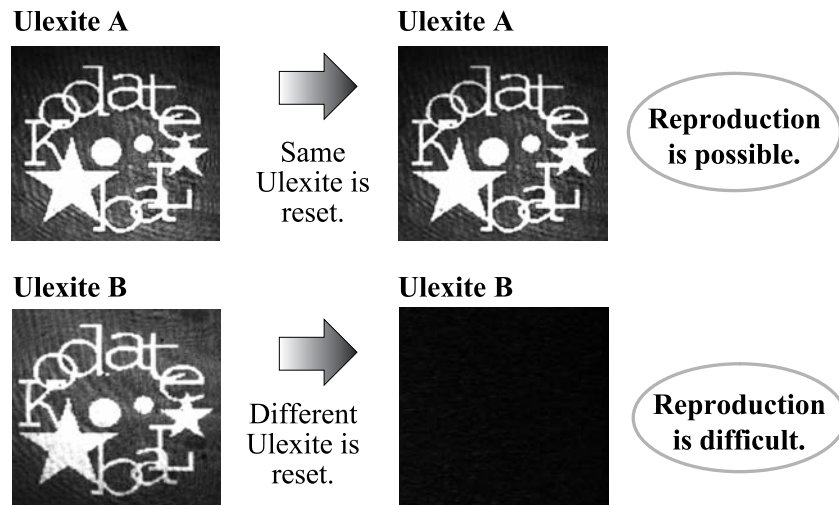


Fig. 8. Experimental results for application of Ulexite as a security key.

と異なる別の Ulexite を再生時に用いた場合は、記録画像を再生することはできなかった。この実験結果から、異なる波面を持つ参照光では読み出しできないことを示し、Ulexite を可搬性のある情報を読み出す唯一の鍵として用いることができる可能性を見出した。また、記録情報を読み出すための鍵を持ち運ぶ際、自然石であればランダム波面生成素子として安価であり、鍵と分からないように加工し、装飾品として身につけることもできる。さらに、装飾品として複雑に加工することにより、システムから取り外し後の再設置が容易であると期待できる¹⁵⁾。

5. ま と め

ランダムパターン光多重記録システムにおいて、ランダムパターン生成素子としてファイババンドルに代わり自然石の Ulexite を用いて実験と評価を行った。Ulexite を用いた多重記録実験においては、Ulexite の回転角 0.2° 、物体光と参照光は、 0.55 mW 、 5.55 mW で $1:10$ とし、1枚当たり 120 sec の記録時間で多重記録を行った。その結果、100の画像を多重記録に成功した。また、Ulexite を用いた再生画像の評価として、BER の算出を行った結果 $(3.8 \pm 0.8) \times 10^{-3}$ の値を得ることができた。さらに、ファイババンドルと Ulexite の材料の特性を比較するために、それぞれに照射する物体光と参照光を固定し、全く同じ記録条件で再生画像を取得した画像を用いて BER の算出を行った。その結果、ファイババンドルの BER は $(5.4 \pm 0.5) \times 10^{-3}$ の値を得、今回の実験では Ulexite の方が忠実に画像を再現できることが分かった。これは、Fig. 2 に示す細かいスペックルパターンより、素子を通じた光の状態がよりランダムになっていることも要因の一つだと考えられる。また、ランダムパター

ン生成素子の再設置による記録画像の再現性では、ファイババンドルと Ulexite 共に、記録した素子ならば再生ができることを示した。よって、複製可能な人工物のファイババンドルでは、複数の鍵が存在する可能性があるが、複製が困難な Ulexite では安全性の高いキーへと応用できると考えられる。複製が困難である自然石をランダムパターン生成素子として用いることにより、機密な情報を守る鍵として、また装飾品として身につけ、鍵と分からず持ち運びができる安心・安全な社会を構築する重要なセキュリティキーとして使用できる可能性を見出した。

参 考 文 献

- 1) D. Psaltis and F. Mok: *Sci. Amer.* **273**, 52-58 (1995).
- 2) J. Ashley, M.-P. Bernal, G.W. Burr, H. Coufal, H. Guenther, J.A. Hoffnagle, C.M. Jefferson, B. Marcus, R.M. Macfarlane, R.M. Shelby, and G.T. Sincerbox: *IBM J.RES. DEVELOP.* **44**, 3, 341-368 (2000).
- 3) C.C. Sun, W.C. Su, B. Wang, and Y.O. Yang: *Opt. Commun.* **175**, 67-74 (2000).
- 4) W.C. Su and C.H. Lin: *Appl. Opt.* **43**, 2298 (2004).
- 5) P. Réfrégier and B. Javidi: *Opt. Lett.* **20**, 767-769 (1995).
- 6) O. Matoba and B. Javidi: *Appl. Opt.* **43**, 2915 (2004).
- 7) X. Tan, O. Matoba, T. Shimura, K. Kuroda and B. Javidi: *Appl. Opt.* **39**, 6689 (2000).
- 8) X. Tan, O. Matoba, T. Shimura, and K. Kuroda: *Appl. Opt.* **40**, 4721 (2001).
- 9) O. Matoba and B. Javidi: *Appl. Opt.* **38**, 7288-7293, (1999).
- 10) Y. Okazaki, E. Watanabe, and K. Kodate: *Technical Digest of International Symposium on Optical Memory 2003*, **278** (2003).
- 11) Y. Takayama, Y. Okazaki, J. Zhang, T. Aruga, and K. Kodate: *Optics Communications*, **242**, 411-415 (2004).
- 12) Y. Takayama, Y. Okazaki, J. Zhang, T. Aruga, and K. Kodate: *Appl. Opt.* **43**, 1331 (2004).

- 13) 岡崎佑美, 高山佳久, 渡邊恵理子, 小館香椎子: レーザー研究, **6**, 33, pp.399-403 (2005).
- 14) 入沢美沙子, 石井裕子, 高山佳久, 岡崎佑美, 渡邊恵理子, 小館香椎子: 第3回ボリュームホログラム, メモリ技術研究会 (2005).
- 15) 石井裕子, 入沢美沙子, 高山佳久, 渡邊恵理子, 小館香椎子: *Optics Japan 2005* 講演予稿集, 426-427 (2005).
- 16) Y. Ishii, M. Irisawa, Y. Takayama, E. Watanabe and K. Kodate: *Proceedings of SPIE*, Vol.**6136**, 61360N-1-9, (2006).
- 17) 石井裕子, 入沢美沙子, 高山佳久, 渡邊恵理子, 小館香椎子: レーザー学会第26回講演予稿集, **227** (2006).
- 18) T. Kume, S. Yagi, T. Imai, and M. Yamamoto: *Technical Report of IEICE* **99** (2000).

Experiment and Evaluation of Random Patterns Optical Multiple Recording by Ulexite

Yuko Ishii¹, Misako Irisawa¹, Yoshihisa Takayama², Eriko Watanabe¹ and Kashiko Kodate¹

¹The Graduate School of Science, Division of Mathematical and Material Structure Science,
Japan Women's University

²Japan Aerospace Exploration Agency

(Received November 8, 2006)

Abstract: A holographic optical memory is possible to have a large capacity and a higher transfer rate, and have been researched actively as the next generation memory. Moreover, it is expected as a safer information record method because the reproduction of encrypted three-dimensionally hologram information becomes difficult. As for the safety of the recorded information, that of the key for the information to reproduce is also important. Our research team has thus far examined the simple and compact fiber bundle-based recording system by random patterns of phase and polarization of reference beam and has experimentally confirmed effectiveness. In addition, it is difficult for this system to produce quite the same random reference patterns. Therefore, we think that the hologram recorded by this technique is suitable for the application to security. Then, a fieldstone Ulexite (chemistry: $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) is introduced as a device to produce random reference patterns, making use of its similar structure to a fiber bundle, and presented here as an important key to transmit information. As Ulexite is a natural mineral resource, in addition portable and irreproducible, it can be used as a safe key to a recording and reading appliance.

In this paper, Ulexite was used for random multiplexing for 100 images. We confirmed BER evolution of reproduced images, then repeatable nature of recording images by Ulexite reset. We were convinced that fieldstones could be used as the security in the recording images and readout images.

Key words: Volume holographic multiplexing method, random reference patterns, fieldstone, Ulexite, image evolution.