

ホールバーニングによる高密度光メモリー

NTT 基礎研究所

光 永 正 治

High-Density Optical Memory by Hole Burning

Masaharu Mitsunaga

NTT Basic Research Laboratories

Abstract

A crystal doped with europium ions as impurities, specifically $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ (or $\text{Eu}:\text{YSO}$), is an attractive material as a candidate of high-density frequency-domain optical memory by using persistent spectral hole burning at low temperatures. Due to its large inhomogeneous-to homogeneous linewidth ratio, optical data storage of multiplicity of 10^7 can be expected within a single optical spot.

Here principles and typical examples of such hole-burning optical memories are reported, including holographic motion picture as one of the most interesting topics in this field.

Furthermore time-domain data storage (photon-echo memory), which is another way of storing information in the absorption spectrum by using temporal interference of optical pulses, is also mentioned in detail.

1. はじめに

固体材料における不均一に広がった吸収線を用いた周波数（あるいは波長）多重光記録の研究が盛んである¹。この分野は従来は有機色素をドーブしたポリマーを用いた光化学ホールバーニングの研究がメインであったが、材料として結晶中の希土類イオン、特にユーロピウム（Eu）イオン、を用いる事で、新たな展開が生まれつつある。Euイオン結晶は、低温においては、均一幅が1 kHzと固体中で最も狭く、またこれと関連して、記録容量を表わす不均一幅と均一幅の比も 10^7 と大きく、さらには記憶時間も長い、書き込みの効率も良い等、周波数多重

記録材料としての数々の特質を有する^{2, 3}。この小論では、Eu:YSOを材料として念頭において、周波数多重記録の基本であるホールバーニングの原理を解説し、その応用としてのホールバーニングメモリー、またそれを用いた画像記録であるホログラフィック動画記録について概説する。さらには時間領域における光パルスの干渉効果により情報を記録するフォトンエコーメモリーや情報処理に関しての話題を紹介する。

2. ホールバーニングの原理

Eu:YSOを始めとして、固体の分光に使われる多くの材料は、低温において不均一に広がった吸収スペクトルを持つ。例として、Eu:YSOの $^1\text{P}_0 - ^3\text{D}_0$ 遷移(580nm付近)に相当する吸収スペ

クトルを図1に示す²。サイトの違いによる2つのピークが観測される。6 Kにおける吸収線幅は、サイト1で8.6GHz、サイト2で5.6GHzとなるが、これは不均一幅によるものである。

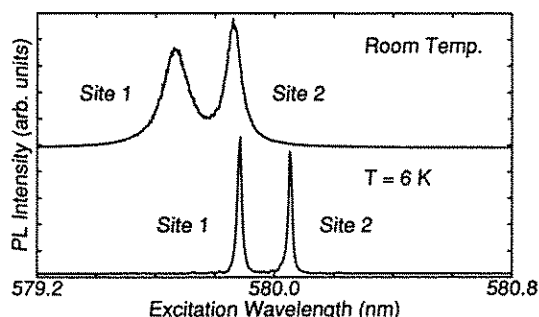


図1. フォトルミネッセンス (PL) で観測したEu:YSOの ${}^7F_0-{}^5D_0$ 遷移における吸収スペクトル (上は室温、下は温度6 K)。

ここでまず、不均一幅と、均一幅について、言及しておきたい。Eu:YSOの場合、結晶中には、光の吸収を受け持つEuイオンが $10^{14}-10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 程度の濃度で存在する。さて、一つ一つのイオンは均一幅と呼ばれる、非常に鋭い、幅1 kHz程度の吸収線幅を示すが、その吸収ピークがばらついているために、結晶全体としては不均一に広がった約10GHzの吸収線となる。(このピークのばらつきは結晶中のそれぞれのEuイオンサイトにおける電場のばらつきに起因する⁴。) 故に、普通の線形分光の範囲では、図1に見られるように、不均一広がりが観測されるにすぎないが、均一幅程度、あるいはそれ以下の線幅のレーザー光を用いて分光すれば、均一幅の情報がわかる。すなわち、不均一幅内に、 ω_L の周波数のレーザー光 (ポンプ光) を材料に照射すると、 ω_L に共鳴するイオンのみが光を吸収し、他のイオンは吸収しない。光が十分に強ければ、吸収の飽和がおこるので、この吸収飽和がおきた材料を他のレーザー (プローブ光) で観測すれば、吸収線に穴があいた状態、即ちホールバーニングを観測する事ができる。このときのホール幅は均一幅の2倍で与えられる。

このようなホールバーニングのスペクトルは一般にはポンプ光の照射をやめると、もとの吸収スペクトルに回復するので、過渡的ホールバーニングと呼ばれる。例えば、エネルギー構造が2準位系であるような材料 (図2(a)) においては、ホール寿命 (ホールスペクトルの持続時間) は励起状態の寿命で決まってしまう、せいぜいミリ秒である。すなわち、図からも明かなように、共鳴励起、緩和のサイクルの前後で、分布数の変化はないから、吸収スペクトルも過渡的に変化するのみである。しかし、3準位系の材料の場合、照射後もホールスペクトルが長時間持続するものがあり、それを永続的ホールバーニングと呼ぶ (図2(b))。この場合、1と2の間に共鳴する周波数 ω_L のレーザー光により励起されたイオンはある程度の比 (ブランチング比) をもって単位1か単位3に戻ってくるが、このサイクルを何度も繰り返すうち、単位1の分布数は減り、単位3の分布数は増える (これを光ポンピングと呼ぶ)。もし単位3から1への緩和時間が極めて長いと、光照射後も、分布数は変わらない。この状態でプローブ光を入射すると、単位1の分布数はポンプ光照射前より減っているから、 ω_L に相当する吸収は少なくなる。これが永続的ホールバーニングである。

Bu:YSOにおいては、この第三のレベルは基底

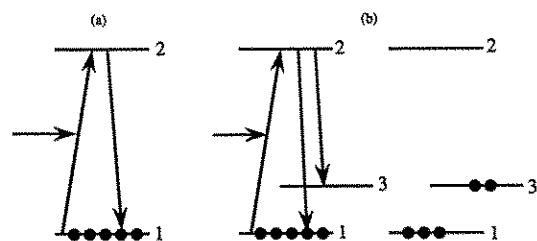


図2. (a) 2準位系における過渡的ホールバーニングと、(b) 3準位系における永続的ホールバーニングを説明するエネルギー図。(b)においては照射前 (左図) と照射後 (右図) で、分布数が変化している。

状態内の別のサブレベルが受け持つ事になるため、第三のレベルも不均一幅の内部にあり、事情は少し複雑であるが、ここではそれらの効果は考えない。図3にEu:YSOにおけるホールスペクトルを示す。これは、20mW、1mmφのレーザーで1秒間、試料を照射した後、十分弱いプローブ光を掃引して透過光強度をモニターしたものである。中心に見えるメインホールの他に両側に上向きあるいは下向きの小さなホールが対称的に見えるのは、上述のサブレベルに基づくもので、アンチホールあるいはサイドホールと呼ばれる。応用の際、現実記録に使うのはメインホールのみであるから、サイドホールやアンチホールの構造の顕著でないものの方が望ましい。

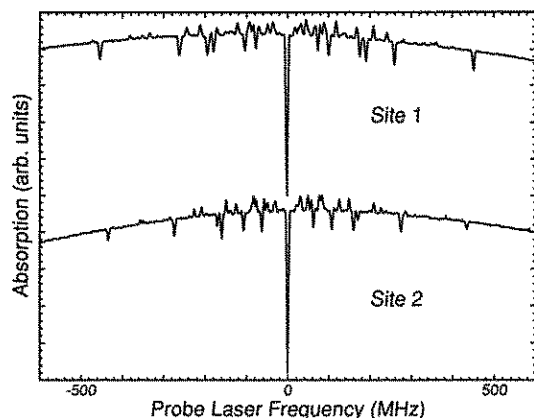


図3. Eu:YSOにおけるホールバーニングスペクトル。上図、サイト1。下図、サイト2。温度6 K。

3. 周波数領域情報記録

さて、上述のホールバーニングをレーザー光周波数を違えて何度も繰り返す事により、多重オールバーニングが実現する。Eu:YSOの場合、不均一幅(1 kHz)と均一幅(10GHz)の比から、 10^7 程度の記憶容量を持つホールバーニングメモリが期待される。これは、現在のコンパクトディスクに代表される光メモリが、空間領域に情報を記録するのに対し、周波数領域に情報を記録するものであり、新しい次元での情報記

録といえる。

ホールバーニングメモリーの一例を図4に示すが、これは128ビットのASCIIコードの周波数領域データをEu:YSOの不均一幅内に書き込み、読み出したものである。40MHzの領域にビット間隔300kHzで記録されている。ホールの検出方法にはいろいろあるが、この例の場合、次節にも出てくるホログラフィーの手法⁵を用いているため、バックグラウンドのない、S/Nの良い信号を検出する事ができる。この場合、信号光はプローブ光からの回折光として観測される。レーザーの出力安定性や、周波数安定性の問題で、信号光のピークにかなりばらつきが見られる。

また、現状では、レーザーの線幅等の問題で、理論値である 10^7 ビットの記録にはほど多く、せいぜいこの例のように数百ビット程度の記録が報告されているのみである。

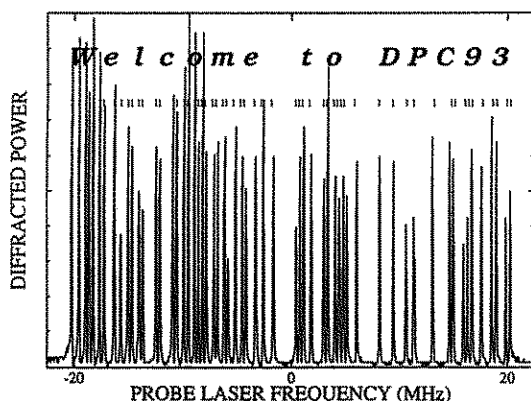


図4. Eu:YSOにおけるホールバーニングメモリーの例。

4. ホログラフィック動画記録

上述のホールバーニングメモリーの一つの応用として最も興味深いのは、ホログラフィック動画記録であろう^{6,7}。図5のようなホログラフィーの配置で、図4のようなホールバーニングメモリーのホールの一個一個に画像を書き込めば、多重画像の記録が実現するが、さらに、レーザー周波数を連続的に掃引しながら、時間

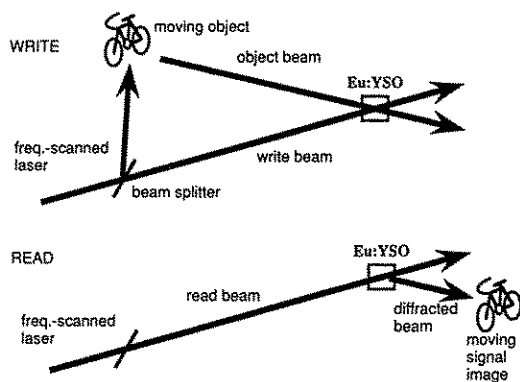


図5. ホログラフィック動画記録における書き込みと読み出しの配置図。

的に変化する物体を記録する動画記録ができる。このような全く新しいタイプの動画記録は、従来の映画やビデオと本質的に異なり、記録媒体を全く動かさずに、単にレーザーの周波数掃引のみで記録できるので、数々の利点が生まれる。まず、高速周波数掃引を行う事で、高速現象の記録が可能である。簡単な理論によると、時間分解能は媒質の不均一線幅で決定され、Eu:YSOの場合、1ナノ秒程度的高速撮影が理論的には可能である。また、空間画像を空間領域に記録する従来のやり方では、原理的にコマ取りの不連続な記録しかできなかったが、周波数領域を用いる事で、画像の連続記録が実現する。

図6に実際に記録された映画の一部を示す。

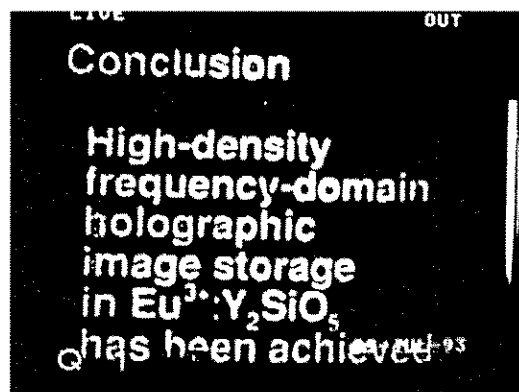


図6. ホログラフィック動画記録における再生信号画像の一例。材料はEu:YSO。温度7 K。

これは文字画像の例であるが、かなり鮮明に記録されているのがわかる。この例では、図5のような反射型の物体光ではなく、透過型の配置を採ったため、立体画像の記録はできなかったが、立体映画も技術的にも問題なく実現できると思われる。

5. フォトンエコーと時間領域情報記録

前述のホールバーニングを光パルスの干渉効果として時間領域で行ったのが、フォトンエコーであり、それを情報記録に結び付けたものをフォトンエコーメモリーと呼ぶ^{8, 9)}。ここでは、フォトンエコーの理論を詳述するよりも、簡単にその原理を述べるにとどめる。過渡的4光波混合の理論によると、媒質の吸収線に共鳴し、しかも時間的に変化する光パルス信号が入射した場合、そのパワースペクトルが材料の吸収スペクトル変化に対応する事が知られている。例えば、時間間隔 τ を持ったデルタ関数で記述できる光パルス対、

$$\varepsilon(t) = \delta(t) + \delta(t - \tau) \quad (1)$$

が入射したとすると、そのパワースペクトルは、

$$S(\omega) = \left| \int dt \exp(-i\omega t) \varepsilon(t) \right|^2 \\ = 2(1 + \cos(\omega\tau)) \quad (2)$$

となり、パルス間隔の逆数の周期の正弦変調が不均一幅に記録される事になる。つまり、パルスの時間的な干渉の縞模様が周波数領域に記録される。この情報を時刻 t_R の読み出しパルスで読み出す時の信号は、(2)の逆フーリエ変換で次のようにあらわされる。

$$P(t) = \int d\omega \exp(i\omega(t - t_R)) S(\omega) \quad (3)$$

これは、以下のような2つのデルタ関数であるが、

$$P(t) = \delta(t_R + \tau - t) + \delta(t_R - \tau - t) \quad (4)$$

第2項は読み出しパルス以前にピークを持つパルスとなり、因果律に反する。よって、信号

光は、時刻 $t_R + \tau$ にピークを持つパルスとなり、これを（2パルス）フォトンエコーと呼ぶ。

このような光の干渉を用いた4光波混合は時間領域ホログラフィーとも呼ばれ、図7のように、空間的な4光波混合（ホログラフィー）と強い類似性を持つ。すなわち、空間的干渉であるホログラフィー（図左）においては、2つの書き込みビーム（WRITE と DATA）により、空間的干渉縞あるいは、空間格子を書き込み、媒質はその格子を記録することになる。読み出しの時、読み出しビーム（READ）を入射すると、空間格子からの回折光として、信号光が観測される。まったく同様の議論が時間周波数領域の干渉効果であるフォトンエコーの場合にも成立し、まず、2つのパルス（WRITE と DATA）による周波数干渉縞あるいは、周波数格子の書き込みが行われる。その後、読み出しパルス（READ）を入射して、周波数格子からの回折光として、信号パルス（フォトンエコー）を観測する。このような4光波混合は重ね合わせの原理が成り立つから、数多くのデータビーム、あるいはデータパルスが入射されても、縞模様が複雑になるだけで、媒質はそれを記録する事ができる。空間の場合、それは画像の記録に対応し、時間の場合、それは任意の時間波形を持った光パルスの記録に相当する。このようにして、フォトンエコー

を用いて、時間領域の情報を書き込み、読み出す事ができる。また、上述の理論を発展させると、任意の波形のパルスの入射においては、それらの時間波形の畳み込み（convolution）や、相関（correlation）といった演算をフォトンエコーを用いて行う事ができる。つまり、時間領域における、光データ処理として注目される。

フォトンエコーメモリーの実験観測例として、1.6キロビットの時間情報を書き込み、読み出した例を図8に掲げる¹⁰。ここでは、不均一幅内の103個の異なる周波数領域（アドレス）にそれぞれ16ビットの時間情報（元素の周期律表）を記録した。これは、周波数領域と時間領域の両方の情報記録を行ったハイブリッドメモリーの例となっている。一度全ての情報が書き込まれたら、任意のアドレスにレーザーの周波数を調節して、読み出しパルスを照射し、信号時間波形をオシロスコープで観測する事により、そのアドレスの時間情報を誤り率なしで読み出す事ができた。

6. むすび

波長多重光情報記録は、回折限界に依らない、新しい型の光メモリーとして注目を集めているが、Eu:YSOはその中でも有力な材料のひとつといえるだろう。この種の材料に特徴的な弱点として温度特性があり、ヘリウム温度領域でしか動作しないのが、実用化を阻んでいる最大の問題である。今後、材料の探索で、温度特性の改良を計るか、あるいは動作温度はそのまま、高密度化、高速化、新機能の開発等の長所をだしていくか、2つの方向が有り得よう。

参考文献

1. 例えば、W. E. Moerner, "Persistent Spectral Hole-Burning: Science and Applications, Vol. 44 of Topics in Current Physics (Springer-Verlag, Berlin, 1988) を参照されたい。

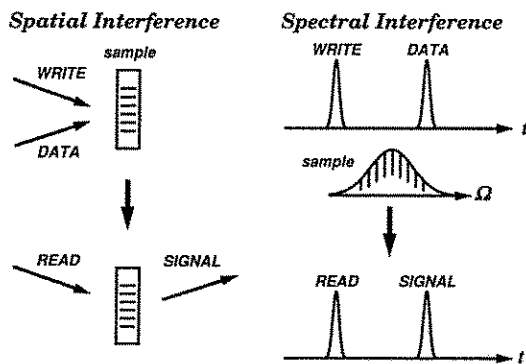


図7. 空間領域の干渉効果であるホログラフィーと、周波数領域の干渉効果であるフォトンエコーとの比較。

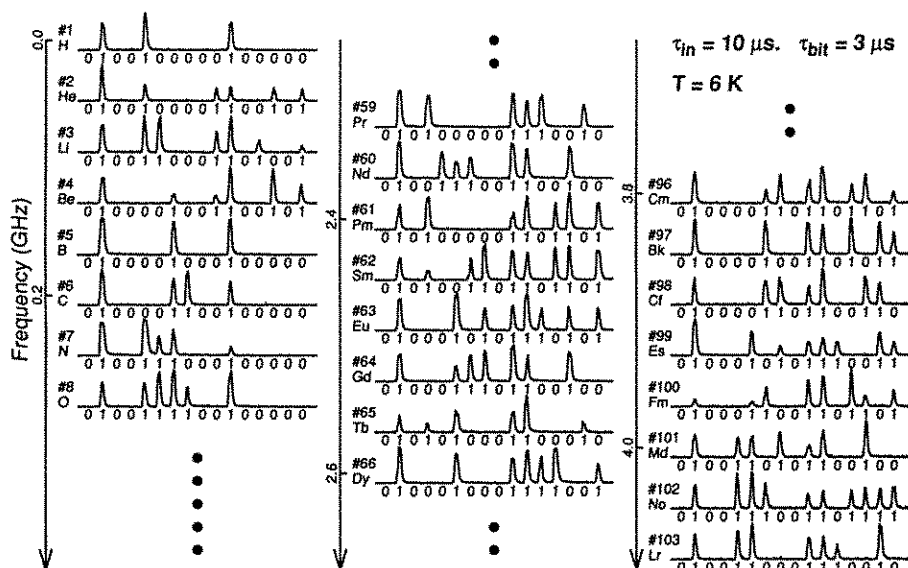


図 8. 1.6キロビットの時間周波数領域情報記録の例。ビット間隔は3マイクロ秒。
アドレス間隔は40MHz。それぞれの読み出しパルスは $t = 0$ に入射する。
材料はEu:YSO。温度 6 K。

2. R. Yano, M. Mitsunaga and N. Uesugi, Opt. Lett. 16, 1884(1991).
3. R. Yano, M. Mitsunaga and N. Uesugi: J. Opt. Soc. Am. B9, 992(1992).
4. R. M. Macfarlane and R. M. Shelby, "Spectroscopy of Solids Containing Rare Earth Ions", A. A. Kaplyanskii and R. M. Macfarlane, eds. (North-Holland, Amsterdam, 1987).
5. A. Renn, A. Meixner, U. P. Wild and F. A. Burkhalter, Chem. Phys. 93, 157(1985).
6. M. Mitsunaga, N. Uesugi, H. Sasaki, and K. Karaki, Opt. Lett. 19, 752 (1994).
7. 光永正治、上杉直、佐々木浩子、唐木幸一、応用物理64, 250(1995).
8. T. W. Mossberg, Opt. Lett. 7, 77(1982).
9. M. Mitsunaga, Optical and Quantum Electronics 24 1137(1992).
10. M. Mitsunaga, R. Yano and N. Uesugi, Opt. Lett. 16, 1890(1991).