

体積型ホログラフィーの可能性

志 村 努

はじめに

筆者は、日本光学会傘下のボリュウムホログラフィックメモリー (VHM) 技術研究グループで 15 年以上にわたり活動を行ってきた。企業でのホログラフィックメモリーの開発においては第 3 次のブームともいべきものが 2000 年ごろから始まり、一時は大きな盛り上がりを見せ、本研究グループも企業研究者が主導して立ち上げたものだった。しかし結局実用化には至らず、2010 年の少し前ごろから一気にブームが収束し現在ではホログラフィックメモリーを開発している企業はほとんどなく、いくつかの大学で細々と研究が続けられているというのが現状である。しかし、この過程で得られた知見、特に体積型ホログラムへの多重記録、また記録材料であるフォトポリマーに関しては、現在はヘッドマウントディスプレイ (HMD) など体積型ホログラムの別の分野への応用という意味で活用が期待されるようになってきた。本稿ではホログラフィックメモリーの研究で得られた知見を簡単にまとめ、今後の体積型ホログラムを使った光学技術の展望について少し述べてみたい。

1. ホログラフィックメモリー研究の成果

ホログラフィックメモリーの研究は下火になってしまったが、研究の過程で得られた知見は多い。大きなものは以下の 2 点である。

1.1 収縮率の小さいフォトポリマー

2000 年ごろに始まった第 3 次のホログラフィックメモリーのブームは、反応時の収縮率の小さいフォトポリマーの登場に端を発している¹⁾。一般にフォトポリマーでは書き込み時のポリマー化反応により記録媒体の収縮が起きるが、支持基板の界面面内方向と垂直方向で非等方的な収縮が起き、体積型ホログラムの場合、ブラッグ条件から外れて画像の劣化と回折効率の低下が起る。記録材料に比べて許容される収縮率が小さく、実用的に許容される収縮率は 0.3% 以下といわれている。また、二次元画像を小さい回

折効率で多数枚重ね書きするために、大きな書き込みダイナミックレンジが要求される。これはモノマーの分子分極率とモノマー密度の積に比例する。小さな収縮率と大きなダイナミックレンジの両方が同時に要求されるという点が、ディスプレイホログラフィー用記録材料との違いである。このような観点から、第 3 次ブームの間にフォトポリマー材料にはさまざまな工夫が施され、大きな進歩があった。

1.2 記録システム

第 3 次ブームの最中には、記録方式の進展もあった。ブラッグ回折の角度選択性を用いて二次元画像の重ね書きを行う角度多重方式では、隣接するページ間のクロストークを低減するために、ホログラムと共役な位置に 1 ページ分のホログラムの大きさの開口を置き、単一ページのみを切り出すポリトピックフィルターが考案され、記録密度の向上が図られた²⁾。また、コリニア方式という、参照光と信号光が同一の空間光変調器から供給する形式システムが提案された³⁾。これは光学系が単純で、また共通光路干渉であるため外乱に強い、光源のコヒーレンスがさほど高くなくてもよい、などの特徴をもっていた。ただ、いずれの方式も多重度の増加に伴うノイズの増大、記録材料の安定性・再現性などの問題から実用化には至らなかった。とはいえ、そのシステム開発の過程では、多重記録されたホログラムの記録再生の解析法やノイズ発生メカニズムに関して、多くの知見が得られた。

この 2 つの方式以外に、球面波シフト多重と記録メディアの回転を組み合わせた記録方式も提案されており、システム開発としては今後の動向が注目される⁴⁾。

2. 体積型ホログラムの今後

体積型ホログラフィーの応用としては、このところ新たな展開がある。これにホログラフィックメモリー開発の経験をもつ研究者、技術者の知見が役に立つのではないかと考えている。

東京大学生産技術研究所 E-mail: shimura@iis.u-tokyo.ac.jp

2.1 結像光学系への体積ホログラムによる回折光学素子の導入

近年、Code-VやZemaxといった光線追跡を基本とする市販の光学設計ソフトで、体積型ホログラムを含んだ光学系の設計が可能となりつつある。これはHMDやヘッドアップディスプレイ(HUD)の小型化が強く望まれる中で、体積型ホログラフィック光学素子が、光学設計をスネルの法則から解き放ち、設計自由度の大幅拡大をもたらすものと期待されている。設計という面に限れば、体積型ホログラフィック光学素子の威力は絶大である。

ただし、問題はこれをいかに製造するかという点で、特に現状記録材料としてフォトポリマー以外の選択肢がないため、ホログラフィックメモリーで問題となった露光条件の最適化の難しさ、品質の安定性、感度の温度依存性、保存時の品質変化などの問題はそのまま残っている。また、体積型ホログラムは光露光で書き込む必要があるということも技術的な難しさの要因となる。先にホログラムとして露光して製作し、後から光学系に組み込む場合には、素子の位置合わせが通常の光学素子よりも難しい。逆に、光学系を組み立ててから最後にホログラムを露光する方式では、ホログラムとしては完全なものになるが、露光は難しく、大量複製も困難という問題がある。

とはいえ、ホログラフィックメモリーの経験がある人にとっては当たり前だが、そうでない人には容易に発想できない技術を活用すると、これまでにない面白い光学系が作れる可能性がある。その代表例がホログラムの多重化である。これにより、同一空間に複数の異なる光学素子を重畳して配置するという、常識はずれな光学系が実現できる。もちろん製作の困難さはあるものの、光線の入射角に応じて自由に反射方向、屈折方向を変えることが可能になる。

2.2 体積型ホログラフィック光学素子に最適化したフォトポリマーの開発

現状のフォトポリマーは、ホログラフィックメモリー用かディスプレイホログラフィー用に開発されたものであり、体積型ホログラフィック光学素子のために最適化されたものは存在しないのが現状である。そもそも要求スペックも明らかになっていないので、まずは光学系あるいは光学素子を考えて、そこから材料への要求を整理していく必

要がある。メモリー用では、多重度はきわめて高く、単一ホログラムの回折効率はきわめて低い。一方ディスプレイ用は、多重記録はせず回折効率が大きい。回折光学素子用のホログラムはこれらの中間になるものと思われる。

2.3 フォトポリマー以外のホログラフィー記録媒体の開発

フォトポリマーの扱いにくさの主要な要因は、有機材料であるためと考えられる。できれば無機材料で体積型ホログラフィーを記録したいというのは筆者が常々考えている夢だが、普通に考えればそれは無理である。だが、光書き込みではなく、半導体プロセスによる計算機体積ホログラムの作製であれば、きわめて困難ではあるが不可能ではない。近年の半導体プロセスの積層化の進展を考えると、ある程度の厚さのある三次元的なホログラムを半導体で作成することは夢ではないと考えている。ただし、材料自体は無機材料だが、半導体プロセスの大半にはレジストの露光やエッチングなど、化学的なプロセスが多く含まれており、デバイス作製の過程で化学反応から完全に逃れることは難しいかもしれない。

ま と め

ホログラフィックメモリー研究の収束、昨今のHMD、HUD開発の盛り上がりから、体積型ホログラムの今後に関して考えるところを述べてみた。ホログラフィックメモリー研究を通して得られた知見は、上記に述べた以外にもいろいろ使えるのではないかと思っている。メモリーの光学系がかなり特殊なものだったため、ホログラフィックメモリーの常識は結像光学系の非常識、という面もあり、これを逆手にとって新しい展開を導くことができればよいと考えている。

文 献

- 1) L. Dhar, K. Curtis, M. Tackitt, M. Schilling, S. Campbell, W. Wilson, A. Hill, C. Boyd, N. Levinos and A. Harris: Opt. Lett., **23** (1998) 1710-1712.
- 2) K. Anderson and K. Curtis: Opt. Lett., **29** (2004) 1402-1404.
- 3) H. Horimai, X. D. Tan and J. Li: Appl. Opt., **44** (2005) 2575-2579.
- 4) S. Yoshida, Y. Takahata, S. Horiuchi and M. Yamamoto: J. Opt. Soc. Am. A, **32** (1915) 224-227.