ナノテクノロジー講座 (第IX講)

J. Jpn. Soc. Colour Mater., 83 [3], 139-145 (2010)

ナノインプリントの基礎と光学応用

平井義彦^{*,†}

要 旨

ナノインプリントは、高解像性と優れた経済性をもつナノ加工技術として注目されている。その基本的な方式と原理について述べるとともに、多様な材料への適用や、リバーサル・ナノインプリント、ハイブリッド・ナノインプリント、ナノキャストイングなど、多様でより高機能な構造形成の可能性について紹介する。さらに、その工業的な応用としてナノ光学要素を例に応用事例について紹介する。

1. はじめに

ナノ加工技術として工業的に広く用いられている技術に、写真製版技術から発展した半導体リソグラフィ技術がある。電子デバイスの製造のみならず、センサーやディスプレイ素子などの生産には欠かせないものとなっている。しかし、解像度が22 nm以下の性能が求められる次々世代の半導体集積回路の製造には、より短い波長の光源やそれに対応したレンズが必要となるため、技術的な限界とともにコスト的な限界が危惧されている。

このような背景のもとに、樹脂をナノ鋳型でプレスして微細な構造を転写・成型しようとするナノインプリント法が提唱された^{1,2)}。この方法は、超越した解像力が実証されており、最近では、1 nmのカーボンナノチューブを原版として、樹脂への形状転写³⁾が示されている。もう一つの大きな魅力は、従来の半導体リソグラフィ技術に比べ、線源やレンズ系が不要であるため装置のコストが大幅に低減できることが期待され、低コストでナノ構造を工業的に作製できる点が挙げられる。加えて、三次元的なナノ構造や、フィルム上にナノ構造を転写することも可能となる。

最近では、これらの特徴を利用して、さまざまな角度からの光の反射を抑制するためのナノコーン状のアレイなどからなる反射防止フィルム、光ピックアップに用いるための高アスペクトによる構造波長板、数十nmピッチの微細ピット構造からテラビットスケールのパターンドメディアなどの光学要素を中心に産業的な応用が進められているほか、バイオチップ、半導体デバイスへの応用展開も図られている。

ここでは、ナノインプリント技術の基本的メカニズムと、多様なシーズを含めた可能性と、光学要素への応用を中心に紹介する。

2. ナノインプリントとは

2.1 基本方式と転写方法

ナノインプリントの基本原理は、「型」に「粘性材料」を押し込むという単純なプレス成型である。

ナノインプリントには、図-1に示すように、被加工材料として熱可塑性樹脂を用いる熱ナノインプリント^{1,2)}と、光硬化性樹脂を用いる光ナノインプリント⁴⁾の二通りが提案されている。

熱ナノインプリントは、ガラス転移温度以上に加熱した高分子樹脂にモールド(鋳型)をプレスし、冷却後にモールドを離型することで、微細構造を基板上の樹脂に転写するものである。モールドと基板の熱膨張率が異なるものを用いると熱歪や

図-1 ナノインプリントの種類

〔氏名〕 ひらい よしひこ
〔現職〕 大阪府立大学大学院工学研究科 教授
〔趣味〕 旅行, 音楽鑑賞
〔経歴〕 昭和56年大阪府立大学大学院修士課程(電子工学)修了。同年松下電器産業入社。平成8年大阪府立大学工学部機械システム工学科助教授。平成16年同大学大学院電子物理工学分野教授。博士(工学)。

受付日: 2009年10月26日 受理日: 2009年12月21日

Basics of Nanoimprint Technology and its Application for Nano Optics
Yoshihiko HIRAI^{*,†}

^{*}大阪府立大学大学院工学研究科

堺市中区学園町1-1 (〒599-8531)

[†]Corresponding Author, E-mail: hirai@pe.osakafu-u.ac.jp

位置ずれが生じるが、加工しようとする材料の選択肢は広い。

一方、光硬化性樹脂を用い、透明モールドを通して光を照射し樹脂を光硬化させる光ナノインプリントでは、室温でのインプリントが可能となり位置合わせも従来技術を転用できる。しかし、光硬化による樹脂の収縮が生じ、材料の選択肢が限られるなど、それぞれ一長一短がある。

一般には、熱ナノインプリントは、用いる樹脂の機能性を利用した多様な応用に、光ナノインプリントは半導体リソグラフィへの応用に用いられるものと考えられている。

次に、プレスする方式として、平面モールドと被加工材料を平行に設置してプレスする平行プレス方式¹⁾と、ロール状のモールドを回転させながら被加工材料をプレスするローラープレス方式²⁾がこれまでに提案されている(図-2)。いずれも熱および光ナノインプリントが可能で、平行プレス方式では下地との位置合わせが必要な場合や、高精度なモールドが必要な場合に用いられ、ローラープレス方式では、連続した大量生産やシート加工に適している。

2.2 ナノインプリントの成立要件

ナノインプリントによるナノ成型を成立させるためには、従来のプレス成型を超える次の三つの要件がある。

1) ナノモールドの確保

ナノインプリントの解像度と加工領域は、モールドの解像度とその大きさによって定まる。このため、ナノ加工を行うには、ナノサイズのパターンを作製したモールドが必要となる。これは、電子線リソグラフィ技術などによる半導体シリコンプロセス技術により作製できるが、生産性やコストに課題が残る。

2) モールドと基板のコンフォーマル(形状適応)性

モールドを樹脂にプレスする際、従来のエンボス技術やモールドディンク加工から一歩進んだ性能を引き出すために、モールドならびに基板のナノレベルの平坦性と平滑性が要求される。基板やモールドに解像させようとする微細構造以上のうねりや表面粗さがあれば、微細構造は、これらに埋もれてしまう。

図-2 ナノインプリントの方法

一方、基板とモールドとのナノレベルの平行性が必要となる。平行性が確保できない場合、レジストの残存膜厚が不均一になるなどの不都合も引き起こす。シリコン基板の表面粗さと平坦性は、数ナノレベルで確保されているが、さらに高いレベルで大面積にわたるコンフォーマル性を確保するには限界があり、最近ではPSMSに代表されるシリコンゴムなどを利用したフレキシブルモールドを用いた取り組みが報告されている。

3) モールドの離型

ナノインプリントで必ず直面する課題が、モールドの離型である。樹脂がモールドに付着して基板から取り去られると、その部分が欠陥として残るほか、モールドにも欠陥が発生する。これは、構造寸法が微細になれば相対的に表面積の占める割合が多くなり、離型が困難となるためである。

このため、モールドの表面にシランカップリング剤を用いた単分子フッ素樹脂膜のコーティング^{4,6)}などにより、表面エネルギーを下げる対策を施す必要がある。

以上三つの要件が満たされてナノインプリントは成立することになる。

3. ナノインプリントの基本メカニズム

3.1 熱ナノインプリントと成形性

熱ナノインプリントの成形性は、樹脂がモールドパターンの形状どおりに変形されるかによって定まる。熱ナノインプリントに用いる熱可塑性樹脂は、温度によって力学的特性が変化する。ガラス転移温度以下では、弾性的な性質を示しているが、ガラス転移温度を超えると弾性率が低下し、粘性的な性質があらわれ、エラストマと呼ばれるゴム状態になる。さらに温度が上昇すると、粘性流体状態となる。熱ナノインプリントで使用されるのは、ガラス転移温度以上のゴム弾性領域から、熔融状態にかけての温度域である。

熱ナノインプリントに必要な相対的なプレス圧力と、モールドパターンのアスペクト比(h/L)の関係を図-3aに示す⁷⁾。アスペクト比とは、モールドの溝の深さ h をモールドの溝幅 L で規格化した値である。必要なプレス圧力 P は、樹脂の弾性率 E で正規化した値で示す。

樹脂の初期膜厚が、モールド溝の深さ h に等しい場合($t/h=1$)、アスペクト比が0.8程度を中心に、アスペクト比が大きい場合にも小さい場合にもインプリント圧力は増大する。高アスペクト比の場合は、樹脂がモールドパターンの奥まで入り込み難くなり、低アスペクト比の場合にはモールドのエッジに近い部分のみが盛り上がり、パターンの中心部分まで充填され難くなる。いずれも樹脂を完全に充填させるためには、より大きな圧力が必要となる。

図-3b, cに、関連した実験と計算結果を示す。樹脂は、モールド凸部での圧縮応力により大きく変形し、モールドパターンの端部に押し出される。さらに、引っ張りとせん断応力を受けて変形するため、変形はモールド端部で大きくなる。このため、横幅の広いパターンではパターンの中央部分に応力がかからず、変形が生じ難くなる。

たとえば、線幅が約250 nmの微細なパターン(図-3c)は十分に成型できているが、線幅が1.0 μm のパターン(図-3b)は

a) アスペクト比とプレス圧力の解析結果

b) アスペクト比 0.25 c) アスペクト比 = 1

図-3 アスペクト比と樹脂の成型性

中央部分が窪んでおり、成型が不完全となっている。これは、成形性がパターンの絶対寸法によらず、パターンのアスペクト比と、樹脂の相対的な初期膜厚によって決まり、必ずしも小さいパターンが難しいとは限らないことをあらわしている。ただし、表面摩擦や樹脂の分子間の相互作用は考慮していない。限界的な解像性については、理論的に明らかにされていないが、樹脂の膜厚が数十 nm 程度以下の薄膜となると、樹脂の弾性率などの機械的物性が変化し、また界面との影響が増大するなどの影響により、ナノサイズでは成型に高い圧力や時間が要する現象も知られている。このため、ナノインプリントに関するナノレオロジーやナノトライボロジーなどの研究も進められている。

3.2 光ナノインプリントと解像性

光ナノインプリントは、室温で短時間にナノ構造の転写が可能であるため、最近では工業化に向けた取り組みが加速されている。しかし、光ナノインプリントにおける物理現象は多岐にわたり、また複雑で、モールドへの光硬化性樹脂の充填プロセスと気泡の取り込み、ナノ構造中の光硬化性樹脂への光照射、樹脂と照射光との反応過程、光硬化反応にともなう硬化収縮過程などが挙げられる。これらについての詳細なメカニズム解析は、まだ十分とはいえない。ここでは、光硬化性樹脂中での照射光の強度分布について、パターン寸法が与える影響について

図-4 光強度分布の線幅依存性 ($\lambda = 320 \text{ nm}$)

考察した。

周期的に配置された格子状パターンのモールドに樹脂が充填されている状態で、モールド上部から単色光が照射されたものとする。図-4に、線幅 L が、波長 λ に対して $L = \lambda$, $1/2\lambda$, $1/4\lambda$ と変化した場合の計算結果を示す⁸⁾。パターン幅が、波長と同じ場合と、波長の $1/4$ の場合とでは、分布の様子が異なっていることがわかる。双方ともに定在波をとまっているが、波長と同等の場合 ($L = \lambda$) には、入射光は屈折率の大きい樹脂側に引き込まれ、樹脂部分での光強度が増倍されている。

一方、波長の $1/4$ の場合には、照射された光は樹脂と石英モールドの区別なく進入し、そのまま反射されている。これは、モールドのパターンの大きさが波長の $1/4$ 程度以下となると、入射した光はモールドと樹脂のわずかな屈折率差を感じなくなるためである。線幅が波長の $1/2$ の場合には、その中間的な振る舞いとなる。すなわち、パターンサイズがおおむね $1/4$ 波長よりも小さくなると、樹脂／モールドの屈折率差の影響はなくなり、樹脂が均一に照射される。逆にパターンサイズが波長と同程度あるいはそれ以上となると、樹脂／モールドの屈折率差により回折や干渉が発生するため、欠陥の原因となる恐れがある。

したがって、微細なナノパターンでは解像性は問題ないが、サブミクロン以上のマイクロサイズでは光の回折干渉に注意する必要がある。

一方、光ナノインプリントでは、大気圧中において低プレス圧力でインプリントを行う場合に、気泡がモールドパターンに取り込まれる不都合も生じる。このため、気泡による欠陥の発生に注意する必要がある。また、一般に光硬化性樹脂は接着剤の性質も併せもつため、モールドから離型する際に、熱可塑性樹脂と比べると離型に大きな力を要する場合がある。

今後、より高速で欠陥の少ないプロセスの確立のためには、これらの基礎的事項についての科学的解明が必要と考える。

4. ナノインプリントの特徴と応用範囲

ナノインプリントは、優れた解像性がすでに実証されているが、ほかにも多様な可能性がある。ここでは、そのいくつかを紹介する。

4.1 多様な材料への適応

熱ナノインプリントでは、それぞれの用途に応じた多様な材料が利用できる。透明性の優れたアクリル (PMMA) などは、光学部品などへの利用が図られている。

図-5aは、長期間放置すると環境を損なわずに分解され、また体内でも分解されるポリ乳酸のナノ加工例を示す⁹⁾。使い捨てのバイオチップや環境測定チップへの応用が考えられる。一方、これとは逆に耐熱性や耐薬品性に優れ、光学特性にも優れ

a) 生分解性樹脂のナノ成型 (130 nm holes)

b) ガラスプレート表面のナノ成型 (250nm Line & Space)

図-5 多様な材料表面へのマイクロ・ナノ加工

a) 曲面構造の形成

b) ハイブリッドインプリント法による
マイクロ・ナノ混在構造成型

図-6 多様な構造の一括成型

たガラス材料についてもナノ成型が可能である。

図-5bにガラス表面に施した格子の成型結果を示す¹⁰⁾。また、バイオセンサーなどで用いる抗原の吸着を増大させて感度を向上させるため、専用の特殊な樹脂表面をナノインプリントで加工して表面積を増大させる相乗効果を狙った試みも行われている¹¹⁾。

このように、使用目的に応じた材料のナノ加工を行うことにより、新しい機能や性能の向上が図られている。

4.2 多様な形状の成型

ナノインプリントでは、一度モールドを作製すると繰り返し使用して、複雑な形状も容易に作製できる。図-6aでは、樹脂を電子線リソグラフィにより任意形状に加工した原版を作製し、これをNi電鍍によって複製したものをモールドとして用いた。最小ピッチが2 μmの二次曲面状の変可ピッチ構造が作製できている¹²⁾。また、図-6bは、熱ナノインプリントと光ナノインプリントを組み合わせたハイブリッド・ナノインプリントによる深

a) リバーサルナノインプリントの原理

b) 全転写モードによる3次元積層化ナノチャネル形成

c) 3次元積層化ナノチャネルの作製結果

図-7 リバーサル・ナノインプリントによる三次元成型

さ約50 μmのマイクロ井戸の底面に、直径約130 nmのコーン状の穴を設けたマイクロ、ナノ構造の一括成型結果を示す¹³⁾。

これらは、従来のマイクロ・ナノ加工では複雑な工程が必要であるが、ナノインプリントを用いると一回の転写で多様な形状が成型できる。

4.3 積層三次元構造の作製

これまでは、平面状に多様な形状を転写した例を示したが、リバーサルインプリント¹⁴⁾を利用すると、従来の微細加工では困難であった三次元構造も簡便に作製できる。

図-7aにその原理を示す。モールドにあらかじめ樹脂を塗布したものを用意し、これを樹脂もしくは基板にプレスする。このとき、樹脂の厚さ、プレス温度、圧力を制御することにより、モールド凸部分の樹脂のみが転写されるリバーサルモードと、樹脂全体が転写される全転写モードでの転写が生じる。

リバーサルモードでは、樹脂のガラス転移温度 T_g よりも低温で離型するため、樹脂はプラスチック状態で破断されやすく、モールドの凸部のエッジで破断するため、凸部先端の樹脂が基板側に残される。一方、全転写モードでは、樹脂のガラス転移温度 T_g よりも高温で離型するため、樹脂はゴム状態となり破断されずに基板側に残される。

たとえば、全転写モードにより、上下の樹脂の温度を調整することにより、下層を押し潰すことなく積層することができる。この方法を利用して、PMMAを用いた三層積層ナノチャネル構造の作製プロセスとその結果を、図-7b, cに示す¹⁵⁾。この方法では、モールドの表面処理や樹脂の表面状態を最適化する必要があるが、従来のマイクロマシン製造工程のように犠牲層が必

要なく、一回のプレスで一層分の積層が可能となるため三次元構造の作製が大幅に簡略化できる。フォトニック結晶やマイクロリアクタ、複雑な構造のマイクロマシン作製への応用が期待される。

4.4 ナノキャストイングによる転写

ナノキャストイング法は、図-8に示すように、樹脂を溶剤に溶かしこれを室温でスピコートして微細なモールドに充填させたのち、基板に貼り付けて取り出すものである¹⁶⁾。モールドに、溶剤に溶かした状態の樹脂を回転塗布したのち溶剤を蒸発させて硬化させる。この上にエポキシ系、光硬化性などの接着剤を塗布する。次に、ガラスや樹脂板などの透明基板を用意し、接着剤層に貼り付けて基板と接着する。最後に、基板とともにキャストイングされた樹脂をモールドから離型し、微細パ

図-8 ナノキャストイング法による微細構造の転写プロセス

図-9 ナノキャストイング法による多様な樹脂への転写結果

図-10 大面積形状の転写（PC on PC）

ターンを樹脂に転写する。ナノキャストイング法は、スピンコーターとマスクアライナーなどの既存設備で簡単に対応でき、さまざまな種類の樹脂やシリカガラスなどにも適応できる。さらに、室温プロセスであるため熱収縮の影響は排除される。

ナノキャストイング法では、溶剤に溶ける樹脂材料であれば基本的にほとんどが使用できるため、多くの工業用プラスチックが利用できる。図-9に、ポリカーボネート（PC）、アクリル（PMMA）、そして生分解性樹脂のポリ乳酸（PLA）を用いた成型結果を示す。図-9に示すように、いずれの樹脂も良好な転写が可能であることがわかる。また、基板材料についても、接着剤が有効であるものに対して材料を選ばない。このように、基材、成型材ともその組み合わせを含めて多様な選択肢がある。

一方、モールドに樹脂を塗布できれば大面積一括転写が可能である。図-10に、8インチ基板に線幅1 μm ~ 150 nmの格子状パターンが混在する構造を転写した結果を示す。

5. ナノ光学要素の作製

ここでは、ナノインプリント法を用いたナノ光学要素の作製についての事例を紹介する。

5.1 反射防止構造の作製

ディスプレイ表面や、光ピックアップのマイクロレンズ表面には、それらの機能を向上させるために多層構造の反射防止膜が塗布されていることが多いが、入射する光の波長や入射角度の依存性が大きい。これに代わり、ナノ構造により光の反射を抑制する反射防止構造が提案されている¹⁷⁾。ナノコーン状の構造物をアレイ状に作製したものが代表的なものとして知られている。しかし、特異な形状が必要なため、従来のリソグラフィで作製するには効率が悪くなる。そこで、従来法で作製したナノ構造を原器として用い、ナノインプリントで複製することにより、効率良く作製できる。図-11に、その作製例を示す¹⁸⁾。ここでは、離型性を確保するために、まず熱ナノインプリントを用いて、フッ素樹脂に原器を転写した後（図-11a）、複製したフッ素樹脂をモールドとして、ナノキャストイングにより反射防止構造を複製した（図-11b）。図-12に、複製した反射防止構造の光透過特性の計測結果を示す。原器より2%程度減衰しているが、広い波長領域で反射防止効果が確かめられ、複製したナノ構造が機能していることを確認できた。

図-11 フッ素樹脂を用いたナノキャストイングによる複製

図-12 ナノコーン状の反射防止構造

図-13 高アスペクト比構造による波長板の作製 (400 nm ピッチ)

図-14 波長板の位相特性

5.2 波長板の作製

光ピックアップで用いる波長板は、高アスペクト比のナノ構造を用いることによって作製できる¹⁹⁾。図-13は、ナノキャストリング法によって作製したアクリルの高アスペクト比構造である。図-14に示すように、位相差が生じることが検証できた。

5.3 構造色の複製

ナノ構造を用いることにより、特定の波長を反射あるいは透過させることにより、色素を使用せずに発色させたり、カラーフィルタの作製が可能となる。ここでは、構造色としてよく知られているモルフォブルー構造の複製を行った²⁰⁾。

図-15に、実際のモルフォ蝶の構造色断面 (図-15a) と、擬似構造断面 (図-15b) を示す²¹⁾。従来、擬似構造は、石英基板表面に凹凸構造を作製し、その上に屈折率の異なる薄膜を蒸着して作製していたため、石英基板表面を加工した原版が必要であった。そこで、図-16に示すように、石英原版の微細構造を、

a) 実際のモルフォ蝶の羽構造

b) モルフォブルーの擬似構造

図-15 モルフォブルー構造 (巻頭カラー写真参照)

図-16 ナノキャストリングによるモルフォブルーの複製

図-17 モルフォブルーの複製結果 (巻頭カラー写真参照)

ナノキャストリング法により耐熱性の優れた光硬化性樹脂に転写し、その後薄膜を蒸着して複製した。図-17に、複製したモルフォブルー構造の結果を示す。ナノ構造により、色素を使用

せずに単色に近い色が再現できていることが検証できた。なお、構造寸法を変更することにより、緑色、赤色なども可能となる。

このほか、平面状の二次元的なナノパターンに光を透過させることにより、特定の波長のみを透過させるカラーフィルタ構造なども作製されている。

光学要素は、パターンドメディアや半導体集積回路に比べるとパターン欠陥に対する許容度が大きいいため、離型や成型時の欠陥が生じやすいナノインプリント法の応用として、早い時期の産業化が期待されている。

6. おわりに

ナノインプリント法は、優れた解像性と経済性をもち合わせる微細加工技術として、ナノテクノロジーを具現化するツールとしての応用だけでなく、多様な材料、複雑な構造の作製や転写への展開も期待できる。

なかでも、欠陥の許容度が比較的大きなナノ光学要素への応用として、ナノ構造のみで機能する構造色やカラーフィルター構造、プラズモニクスデバイスなどの高機能ナノ光構造の転写や複製に用いられることが期待できる。

文 献

- 1) S. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom : *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3114 (1995).
- 2) S. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom : *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14**, 4129 (1996).
- 3) F. Hua, Y. Sun, A. Gaur, M. A. Meitl, L. Bilhaut, L. Rotkina, J. Wang, P. Geil, M. Shim, J. A. Rogers, A. Shim : *Nano Letters*, **4**, 2467 (2004).
- 4) M. Colburn, S. Johnson, M. Stewart, S. Damle, T. Bailey, B. Choi, M. Wedlake, T. Michaelson, S. V. Sreenivasan, J. Ekerdt, C. G. Willson : *Proc. of SPIE*, **3676**, 378 (1999).
- 5) H. Tan, A. Gilbertson, S. Y. Chou : *J. Vac. Sci. Technol. B*, **19**, 2811 (2001).
- 6) Y. Hirai, S. Yoshida, A. Okamoto, Y. Tanaka, M. Endo, S. Irie, H. Nakagawa, M. Sasago : *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **14**, 457 (2001).
- 7) Y. Hirai, T. Konishi, T. Yoshikawa, S. Yoshida : *J. Vac. Sci. Technol. B*, **22**, 3288 (2004).
- 8) Y. Hirai, H. Kikuta, T. Sanou : *J. Vac. Sci. Technol. B*, **21**, 2777 (2003).
- 9) K. Morimatsu, N. Takagi, H. Hasuda, Y. Ito, Y. Hirai : *Abstract of 2nd-Nanoimprint and Nanoprint Technology Conference* (Boston, 2003) F8.
- 10) Y. Hirai, K. Kanakugi, T. Yamaguchi, K. Yao, S. Kitagawa, Y. Tanaka : *Microelectronic Eng.*, **67-68**, 237 (2003).
- 11) N. Niimi, K. Okuda, Y. Tsukamoto, H. Kawata, T. Yao, M. Seki, Y. Hirai : *Abstract of 5th-Nanoimprint and Nanoprint Technology Conference* (San Francisco, 2006) P53.
- 12) Y. Hirai, S. Harada, H. Kikuta, Y. Tanaka, M. Okano, S. Isaka, M. Kobayasi : *J. Vac. Sci. Technol. B*, **20**, 2867 (2002).
- 13) K. Okuda, N. Niimi, H. Kawata, Y. Hirai : *J. Vac. Sci. Technol. B*, **25**, 2370 (2007).
- 14) L. -R. Bao, X. Cheng, X. D. Huang, L. J. Guo, S. W. Pang, A. F. Yee : *J. Vac. Sci. Technol. B*, **20**, 2881 (2002).
- 15) M. Nakajima, T. Yoshikawa, K. Sogo, Y. Hirai : *Microelectronic Eng.*, **83**, 876 (2006).
- 16) Y. Hirai, T. Yoshikawa, M. Morimatsu, M. Nakajima, H. Kawata : *Microelectronic Eng.*, **78-79**, 641 (2005).
- 17) H. Toyota, K. Takahara, M. Okano, T. Yotsuya, H. Kikuta : *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, L747 (2001).
- 18) K. Sogo, M. Nakajima, H. Kawata, Y. Hirai : *Microelectronic Eng.*, **84**, 909 (2007).
- 19) T. Yoshikawa, T. Konishi, M. Nakajima, H. Kikuta, H. Kawata, Y. Hirai : *J. Vac. Sci. Technol. B*, **23**, 2939 (2005).
- 20) A. Saito, Y. Miyamura, M. Nakajima, Y. Ishikawa, K. Sogo, Y. Kuwahara, Y. Hirai : *J. Vac. Sci. Technol. B*, **24**, 3248 (2006).
- 21) A. Saito, S. Yoshioka, S. Kinoshita : *Proc. SPIE*, **5526**, 188 (2004).

Basics of Nanoimprint Technology and it's Application for Nano Optics

Yoshihiko HIRAI ^{*,†}

^{*} Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University
1-1 Gakuen-cho, Naka-ku, Sakai, Osaka 599-8531, Japan

[†] Corresponding Author, E-mail : hirai@pe.osakafu-u.ac.jp

(Received October 26, 2009 ; Accepted December 21, 2009)

Abstract

Nanoimprint technology is promising for advanced nano fabrication technology with cost effect and superiors resolution.

In this article, the basic process and principle are described. Also, advanced process such as an application to various materials and fabrication of novel structures using reversal nanoimprint, hybrid nanoimprint, nano casting are introduced. Furthermore, applications for nano optics are demonstrated such as fabrication of structure coolers and anti-reflection structures.