

ラジアル偏光モードで発振するレーザーの開発

電気通信大学レーザー新世代研究センター

助教 森永 実

平成 20 年度一般研究開発助成 AF-2008213

キーワード：ビーム操作、レーザー加工、回折光学

0 はじめに

レーザー光の横モードを断熱的に変換する方法、およびその具体的実現方法として不透明マスク列を用いた横モードの操作についての研究を行なった。これは TEM00 の横モードのビームからラジアル偏光したドーナツ状のビームへの変換を含む。今回レーザー発振には至らなかったが断熱的変換は原理的には効率を 1 に近づけられる変換手法であり高い出力のラジアル偏光ビームを得るための有望な手法だと考える。

1 動機

古典的光源に対するレーザーの有用性の一つは光を狭い領域に集光できることである。この特性はビームの横モードが単一であるときに最も発揮される。単一横モードで発振しているレーザーの横モードの大半はビーム中心で強度が最大で偏光がビーム断面にわたって一様な TEM00 モードである。しかし用途によっては TEM00 モードが最適とは限らない。例えばレーザー加工の分野ではレーザーパワーに対する加工効率を考えるとラジアル偏光のビームが望ましいし、光ピンセットにおいてはドーナツ状のラゲールガウスビームを用いると縦方向の保持力を比較的高くすることができる。

ラジアル偏光のビームもドーナツ状のラゲールガウスビームも最低次のもは TEM01 モードの光から (原理的には) 効率 1 で作ることができる。では TEM01 モードの光を効率よく作り出すにはどうすればいいか。

2 方法

TEM01 モードのビームを作る方法の一つはレーザー共振器内に TEM01 モードを選択するモード選択素子を入れることである。しかしレーザーの利得媒質中での利得の分布は中心で最大になっていることが多くその場合、

一方で TEM01 モードの光強度はビーム中心で 0 なので利得を有効に利用できず高出力を期待できない。もう一つの方法は TEM00 モードを TEM01 モードに変換する方法である。通常このようなモード変換素子はレーザー共振器外に置くが、十分に効率の高い変換素子であればレーザー共振器内に入れてもよい。共振器内に置く場合レーザー利得媒質を横モードが TEM00 モードである位置に配置すれば利得分布を有効に活用できる。

TEM00 モードを TEM01 モードに変換する方法でよく用いられるのはモードの投影である。2つのモードは直交しているので TEM00 モードの波面を傾けたりしてから TEM01 モードに投影する。例としては TEM01 モードに共振させた非縮退光共振器に適当に軸外にアライメントを崩した TEM00 ビームを入射させると TEM01 ビームが出てくる。この場合 TEM00 モードの波面に手を加えることによって TEM01 モードとのモードとしての重なりを作り出しているが、その重なりは大きいものではなく効率は良くない。位相ホログラムを用いると位相は完全に合わせることができるが TEM00 と TEM01 のモードの強度分布の違いによる不整合はどうすることもできない。そこで TEM00 モードから TEM01 モードへの断熱的移行の可能性を検討する。

3 断熱的移行

数式上では TEM00 を TEM01 に写すユニタリ変換を用意すれば効率 1 の移行ができるが、このようなユニタリ変換を与える相互作用を現実の系で実現するのは容易ではない。

ここでは次の手順を取る：

1. TEM00 と TEM01 モードのみを伝播する伝送路を用意する。これは TEM00 と TEM01 間のみのカップリングを作ることが一般には難しいので、モードをこの 2 つに制限し他のモードへの散逸を防ぐためである。

2. その伝送路に TEM00 と TEM01 をカップルさせる細工を適当な間隔で施し、伝搬過程で TEM00 を TEM01 に徐々に変形させる。

1 の伝送路は例えばシングルモード条件より少し太い光ファイバーで実現できる。2 のカップリングを作る方法としては、紫外線照射によって局所的に屈折率変化を起こさせる方法や収束イオンビームによるファイバー側面の加工が考えられる (図 1a)。

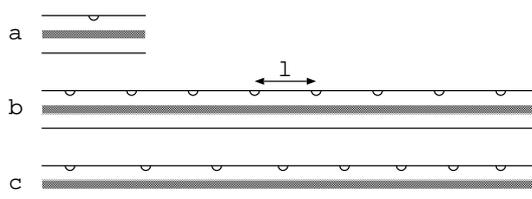


図 1 TEM00 を TEM01 に変換するためのファイバーの加工。

いずれの場合も加工はファイバー軸に対して非対称である必要がある。TEM00 と TEM01 では伝搬定数 k (伝搬方向の波数) が異なるので、効率的なモード変換を行なうためには 2 つのモードをカップルさせる細工の位置 (以下カップル点) の間隔 l がビートの周期 $l_0 \equiv \frac{2\pi}{\Delta k}$ におおよそ等しい必要がある。ここで $\Delta k \equiv k_{00} - k_{01}$ で、 k_{00} と k_{01} はそれぞれ TEM00 と TEM01 の伝搬定数である。 l の取り方は次の 2 つが考えられる。1 つ目は単純に $l = l_0$ とする方法である (図 1b)。これは伝搬方向の空間軸を時間軸に読み替えると 2 準位原子に共鳴光をあてた場合に相当し、最初原子が基底状態 (TEM00 に対応) にあったとするとラビ振動により一定時間後 (一定距離伝搬後) に励起状態 (TEM01 に対応) に移行する。この場合カップル点が細工されている区間の長さは重要である (短すぎても長すぎてもいけない)。また l が l_0 から少しずれていると移行は完全ではない。もう 1 つの方法は加工区間の端から l を l_0 より少し大きな値からスタートし徐々に小さくしていき最終的には l_0 より小さな値にまでもっていく方法である (図 1c・逆に小 大でもよい)。これは 2 準位原子にあてる光の周波数を共鳴周波数をクロスするように掃引することに相当し光強度と掃引速度が適当であれば準位反発により基底状態の原子は掃引後励起状態に移る。一般的に断熱的移行と呼ばれているのはこちらのほうで、この方法ではカップル点が加工されている区間の長さは適当でよく、光の単色性が悪くて l_0 が幅をもつ場合にも使えるという利点がある。ただし加工区間の長さは $l = l_0$ とする方法と比べて一般に長くなる。

4 不透明マスク列

光の横モードを操作する素子として不透明マスクを考える。光軸に沿って並べられた不透明マスクで光ビームのガイド、集光、横モードの変換等を行なおうというのである。この手法はマスクが不透明であるという性質上ある程度のロスが避けられないがビームの種類を選ばないので、レンズやファイバー等を作るための適当な透明媒質が得られないビーム (特殊な波長域の電磁波や原子線など) にも使えるという利点がある。またロスはマスクの数を増やすことにより原理的には 0 に近づけられる。

幾何光学的には不透明マスクはマスクの開口部にきた光を通すだけでありガイドにはならない。しかし光の回折を考えるとそう単純ではない。簡単な例として薄い板を並べたものの端面での回折を考えよう。

4.1 不透明薄板による光の「反射」

半平面をその法線方向にずらしていった一定間隔で並べたものを考える (図 2)。半平面には垂直に近い角度で平面波の光が入射していて、1 つの半平面を含む平面に入射した波は文字通り半平面によって「マスク」され次の半平面を含む平面へと回折していく、というモデルで伝搬の様子を計算する。

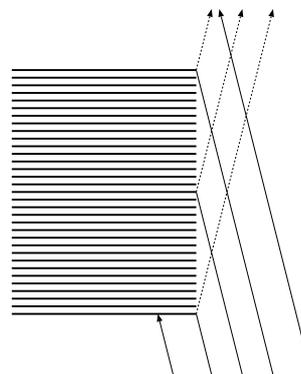


図 2 半平面の列の端面に入射する光。

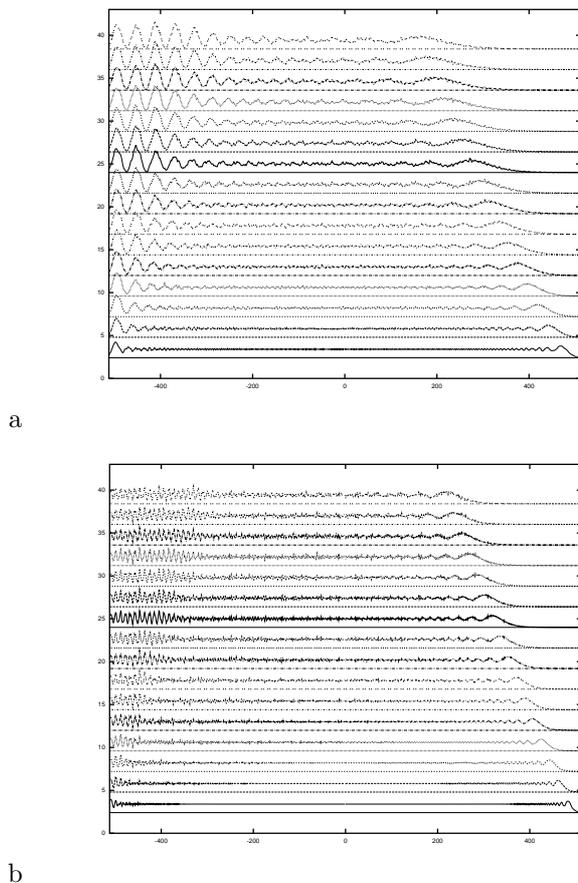


図3 半平面の列の端面に入射した光の回折の様子。

図3は光の回折の様子を見るために光の強度をプロットしたものである。グラフの左端は半平面の列の端面で、光はグラフの下から左斜め上に向かって入射している。グラフの左側に現れている干渉縞状の構造は入射波と「反射波」の干渉によるもので下から上に行くに従って両者の重なり領域が増えるのでそれに伴い干渉縞が現れる領域も拡大している。

図3のaとbの違いは入射角の大小によるもので、入射角が浅いaのほうでは干渉縞の節の位置で光強度がほとんど0になっていることから1に近い反射率が得られていることがわかる。

4.2 ビームの集光

このように光の波長よりはるかに大きい開口をもったマスクを回折長より短い間隔で並べると光をガイドすることが可能であることがわかった。ここでは円形開口

(ピンホール)を並べることによって光を集光することを考える。円形開口の縁を含む円柱を考え、軸上の2点(始点と終点)を結ぶ経路として2点をつなぐ折れ線のうち円柱の内壁をちょうど1度だけ経由するものを選ぶ(図4)。



図4 ピンホール列による光の集光。

経路に対応する位相変化 ϕ (経路長/波長)が一定の範囲(例えば $-\frac{\pi}{2} < \phi < \frac{\pi}{2} \pmod{2\pi}$)にある経路だけ集光に寄与するとしてその「反射」位置のところにピンホール列を設置すれば集光が実現されるだろう。通常のフレネルレンズが同心円状に円環を置いているのに対して軸方向に並べるのである。ただしこの場合だと実際には多重反射も起こるのでそれについても考慮する必要があるかも知れない。

5 TEM00 から TEM01 への移行

不透明マスクによる横モードの操作ということで、細いワイヤーをマスクとして用いて TEM00 から TEM01 への変換を行なう(図5)。

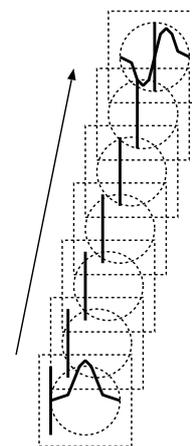


図5 ワイヤーの位置を掃引することによる横モードの変換。

TEM00 と TEM01 の横方向の波動関数は2番目の添字に対応する方向(x 軸に取る)では

$$\begin{cases} \varphi_{00}(x) = \frac{1}{\pi^{1/4}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \\ \varphi_{01}(x) = \frac{\sqrt{2}x}{\pi^{1/4}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

である。TEM00 から TEM01 への断熱的移行ということで

$$\varphi(x) = f_0\varphi_{00}(x) + f_1\varphi_{01}(x) \quad (2)$$

において $f_0 = 1, f_1 = 0$ からスタートして最終的に $f_0 = 0, f_1 = 1$ に持っていければ理想的である。(2) の波動関数は (f_0, f_1 が実数だと) $x = -\frac{f_0}{\sqrt{2f_1}}$ が節になっている。(2) で表されるビームを $x = x_w$ の位置にあるワイヤーでマスクすると波動関数は

$$\varphi(x) - a\varphi(x_w)\delta(x - x_w) \quad (3)$$

で近似される状態に移行する。ここで a はワイヤーの幅 (直径) でありビーム径より十分に小さいと仮定する ((1) では $1/e$ ビーム径は 1 (半幅) に取ってある)。(3) をモード展開すると

$$\begin{aligned} & \{f_0 - a\varphi(x_w)\varphi_{00}(x_w)\}\varphi_{00}(x) \\ & + \{f_1 - a\varphi(x_w)\varphi_{01}(x_w)\}\varphi_{01}(x) + (\text{高次の項}) \end{aligned}$$

となる。伝送路は TEM00 と TEM01 モードしか伝搬させないと仮定しているので高次のモードの減衰長より長く伝搬した後の波動関数は結局 (l_0 の整数倍の位置で)

$$\begin{aligned} & \{f_0 - a\varphi(x_w)\varphi_{00}(x_w)\}\varphi_{00}(x) \\ & + \{f_1 - a\varphi(x_w)\varphi_{01}(x_w)\}\varphi_{01}(x) \end{aligned} \quad (4)$$

となり高次の項は消える。1 本目のワイヤーをビームの左側の裾野におき、2 本目以降は節の位置の少し内側 (光軸側) に置いて光軸方向に寄せていけば $\varphi(x_w), \varphi_{00}(x_w)$ は常に正、 $\varphi_{01}(x_w)$ は常に負なので f_0 は減少し f_1 は増え続ける。損失の大きさや f_0 が 0 に近づいていくのか等についてはもう少し詳しく解析しないと議論はできないが、ワイヤーの径を $a = 0.4$ 、ワイヤーの位置を x_w を -1.5 から -0.05 まで 0.05 刻みで変化させたところ (ワイヤー 30 本)、出てきた光の TEM00 と TEM01 モードの強度は入射光強度に対してそれぞれ 5% と 55% で、損失は 40% となった。ここではワイヤーの間隔を等間隔に取ったが最適化を行えば効率は更に上がるだろう。ただし上記の計算では TEM00 と TEM01 については伝搬損失はないとしたが、実際にはすべてのモードについて損失はあり、ただその大きさが TEM00、TEM01、TEM02、... の順に大きくなっていくというだけである。このことは変換効率を下げる方向に働くであろう。

6 実験

レーザー光を光軸に沿って並べたマスク列に通し透過・回折の様子を見るものである。

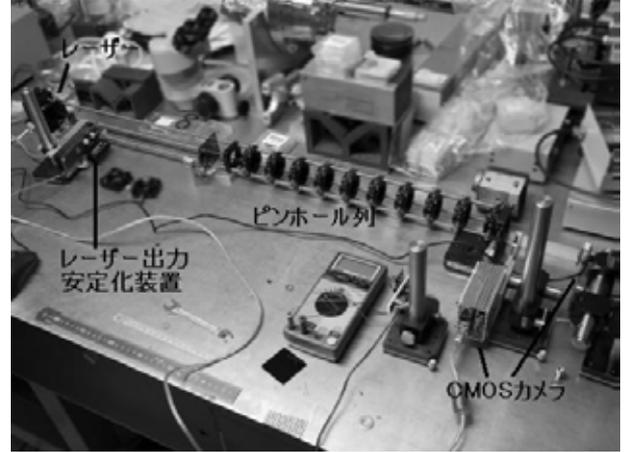


図 6 実験装置。

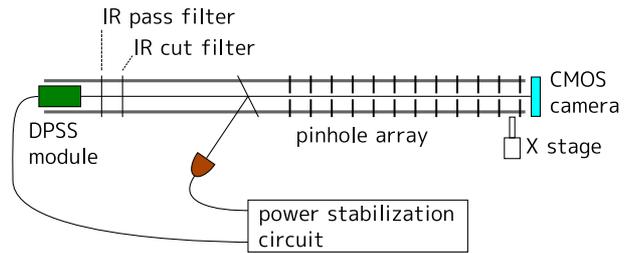


図 7 実験配置。赤外カットフィルターまたは可視カットフィルターを入れることにより 1064nm または 532nm の光を選択する。

光源としては単一横モードの DPSS グリーンレーザーモジュールを用いた。波長が 1064nm の基本波も使うので赤外カットフィルターは外してある。倍波である波長 532nm の光はピンホールのアライメント用に有用であるほかその光で測定も行なえば 1 つの配置に対し 2 つの条件に対するデータが得られデータの収集の効率が上がる。ただしこの DPSS モジュールは倍波に対して出力安定化されていたが、基本波と倍波それぞれに対して出力安定化を切り替えできるようにするため安定化装置・回路を作り直す必要があった。ピンホールは 2 次元ステージにマウントされた上でレール上に並べられている。ピンホールを透過してきた光は CMOS カメラで断面を観測するほか強度も測定される。

6.1 ビームのガイド

まずピンホール列が光ビームをガイドする効果があることを確かめる実験を行なった。

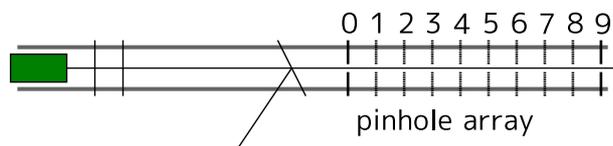


図 8 光ビームのガイドの実験。

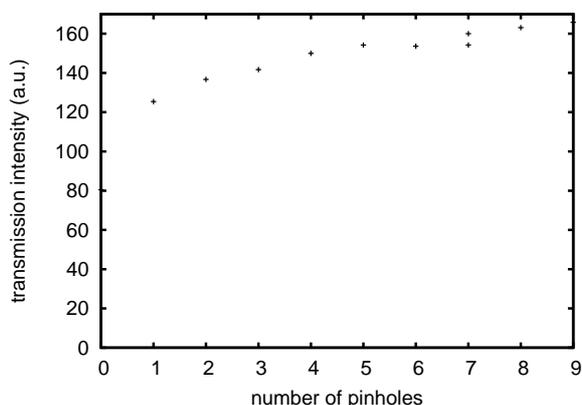


図 9 ピンホールの数に対する透過してきた光強度の変化。

直径 0.5mm のピンホールを最大で#0 から#9 までの 10 個光軸上に配置し、ピンホールを置く位置の間隔は 45mm で 532nm の光を使用した。なおピンホール#0 に入射するレーザー光のビーム径は 2mm 程度であり、従って#0 では平面波がピンホールによって切り出されていると考えてよい。図 9 は最後のピンホール#9 の後ろで光強度を測ったものだが、#9 のピンホールだけ置いたときの透過光強度が横軸の 0、#9 + #0 が横軸の 1、以下#9 + #0 + #1、#9 + #0 + #1 + #2、... がそれぞれ 1、2、3、... に対応する。0 より 1 のほうが透過光強度が大きいのは#9 が#0 のピンホールの（回折による）焦点の近くにあるためだが、さらにピンホールの数を増やしていくと透過光強度が増大していくのが見て取れる。

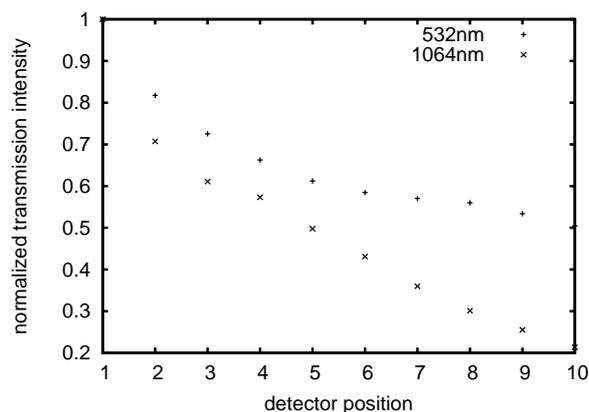


図 10 ピンホール列の各位置での光強度。

ピンホールを 10 個とも直線上に配置したときにそれぞれのピンホールの後での光強度も計測した。横軸の番号は 1 が#0 の後ろで測ったとき、2 が#1 の後ろ、... と対応する。光強度は最初急速に減っていくが（532nm の場合）あるところからはあまり減衰しなくなる。これはビーム断面が最初は矩形であり横方向に大きい波数成分があり、それは急速に失われていくが、小さい波数成分は減衰が小さく生き残っていくためだと考えられる。ビームの断面の観測では強度分布が矩形から次第にガウスビームに近い強度分布に変化するのが見られることからこのことが裏付けられる。



図 11 ピンホール#0 と#3 の後ろでのビームプロファイル。波長 532nm。

一方 1064nm 光のほうは減衰がなだらかになる箇所がない。ピンホールによるガイド効果はパラメータ $\frac{\lambda L}{d^2}$ によって決まり、十分なガイド効果を得るためにはそれが 1 より十分小さい必要があるが、1064nm の場合その条件を満たさないためである（ λ は波長、 L はピンホール間隔、 d はピンホールの半径）。

6・2 ビームの偏向

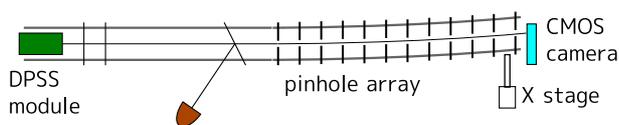


図 12 光ビームの偏向の実験。

次に光ビームを偏向させる実験を行なった。ピンホールを載せているレールはあまり堅固でなく通常両端と中央の3箇所固定して実験をしているが、ここでは出力側をフリーにしてピンホール列をなだらかに曲げた。図 13 は 10 個のピンホール列を透過してくる 532nm の光の強度を列の最後のピンホールの変位に対してプロットしたものである。幾何光学的にはまったく光が出てこない領域でもある程度の出力が得られていることがわかる。

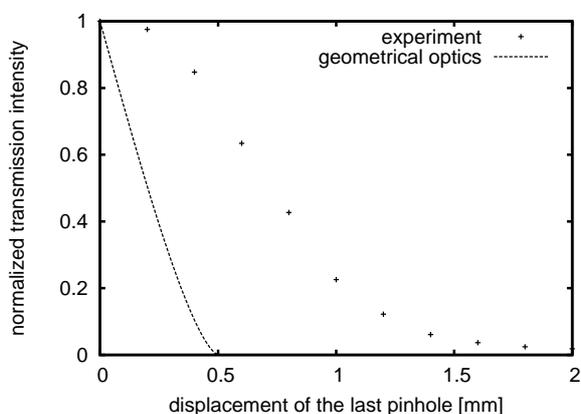


図 13 光ビームの偏向の実験。“+”は実験値、点線は幾何光学的に計算した値。

6・3 ビームの集光

ピンホール列による集光の実験を行なった。使用したピンホールは直径 1mm で光の波長は 1064nm である。

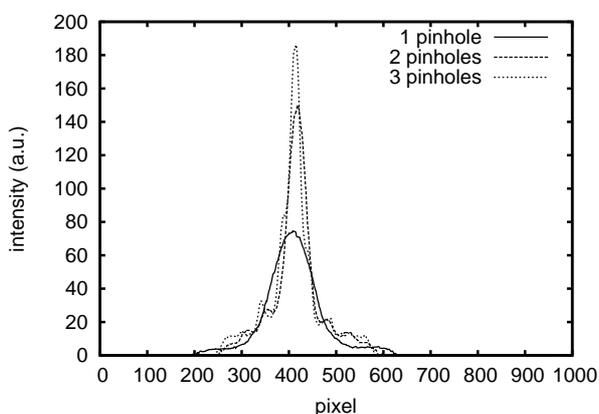


図 14 ピンホール列による集光。335 ピクセルが 1mm に相当。

図 14 はカメラから 322mm の位置にピンホールを置いた場合、さらに 80mm の位置にも置いた場合、それに加えて 35mm の位置にも置いた場合のビーム断面のプロファイルと比較したものである。わずか 3 枚のピンホールでも比較的良好に集光されていることがわかる。

7 終わりに

今回の研究では不透明マスク（ピンホール）列を用いて光ビームのガイド、偏向、集光のデモンストレーションを行ないその基本的な性質を示した。配置できるマスクの数が限られていたことからマスクの数を増やしていったときに本当に効率が上がっていくのか、また肝心のモード変換については実験的にまだ示せていない。現在のマスクを一つ一つ 2 次元ステージにマウントして並べる方法では配置できるマスクの数およびその間隔にはおのずから限界がある。簡単に精度よく多数のマスクを配列する方法を考案し今後の研究につなげていきたい。

謝辞

本研究は天田金属加工機械技術振興財団の平成 20 年度研究助成を受けて行なわれたもので、同財団に深く感謝いたします。

参考文献

- 森永 実：不透明マスク列によるビームの横モード操作、電気学会 光・量子デバイス研究会資料 OQD-10-46-54 15 (2010)
- 固体表面に加工された鋭い稜線の列からの原子波の反射を回折現象として捉えたのは以下の論文である：
- D. Kouznetsov and H. Oberst: “Scattering of waves at ridged mirrors” *Phys. Rev. A* **72** 013617 (2005)
- H. Oberst, D. Kouznetsov, K. Shimizu, J. Fujita, and F. Shimizu: “Fresnel diffraction mirror for atomic wave” *Phys. Rev. Lett.* **94** 013203 (2005)