研究論文

Received November 10, 2023; Accepted January 17, 2024

光学 **53**, 3（2024）119–127

形状計測応用に向けた超小型パターン光源

廣瀬　和義・亀井　宏記・黒坂　剛孝

浜松ホトニクス株式会社　〒434–8601 静岡県浜松市浜名区平口 5000 番地

Compact Pattern Projector toward Profilometry

Kazuyoshi Hirose, Hiroki Kamei and Yoshitaka Kurosaka

Hamamatsu Photonics K.K., 5000 Hirakuchi, Hamana-ku, Hamamatsu, Shizuoka 434–8601

Pattern projection is fascinating technology widely utilized in the fields such as display, measurement, and mobile phone. Among them, projectors, and combination of the diffractive optical element（DOE）and laser source have been typically utilized as the light source, while projector occupies space, and the latter requires precise alignment. For the context, we have developed compact pattern projector in which pattern is directly projected from the on-chip size less than 1 mm square, based on the technologies of the photonic-crystal surface-emitting lasers（PCSELs）and the holography. We named our projector as “integrable Phase Modulating Surface Emitting Lasers”（iPMSELs）. Here, we reported development of beam pattern of the iPMSELs toward low noise fringe pattern for structured illumination and introduced examples of mount of the monolithic array chip for practical use.

Key words: laser diode, photonic crystal, holography, 2D beam pattern, 3D point could, structured illumination, monolithic array, surface mount

は じ め に

半導体レーザーは小型・軽量・高効率という特長をもつが，われわれの研究グループは，さらに自在にビームパターンを出射可能な小型光源の研究を進めてきた．われわれはこれまでに，フォトニック結晶レーザーとホログラムの原理に基づいて，フォトニック結晶を形成する各孔の位置をホログラフィックに変調することで任意の固定ビームパターンが出力できる超小型パターン光源“iPMSEL®”（integrable Phase Modulating Surface Emitting Lasers）を実現してきた．iPMSEL は 1 mm 角未満の半導体レーザーチップから高精細なパターンを直接出力できるため，パターンの異なる iPMSEL を並べて切替駆動することで，パターンを動的に変化させる小型モジュールを実現することも可能となる．本稿では，iPMSEL のビームパターンの形状計測応用で用いられる縞パターンの低ノイズ化と，実用化に向けたアレイ素子の実装事例について述べる．

1. 背　　景

レーザーのさまざまな応用においては，構造化照明のようなパターン光を用いることが多い．このためには，ガルバノミラーや MEMS（micro electro mechanical systems）ミラーといった機械的手段を用いたビームのスキャンによる方法や，回折光学素子（DOE: diffractive optical element）や LCOS-SLM（liquid crystal on silicon spatial light modulator）といった位相変調デバイスを用いたパターン形状制御が行われてきた．ただし，これら機械的手段や位相変調デバイスを用いた方式では原理的に光源以外でもスペースが必要となり，たとえ小型・軽量の半導体光源を用いたとしても，光学モジュール全体としては大型化してしまうという課題があった．

また，ビームパターンの制御にはホログラム技術[1–4]が以前から知られてきた．ホログラムは，光の振幅と（空間）位相の制御によって，入射光を設計されたビームパターンに変換する手法である．一例として，1960 年代に提案された Detur Phase ホログラム[2–4]は，周期的な格子点に対して位置と大きさを変調した開口を有する孔空き板に入射光を透過させ，所望のビームパターンに対応する逆フーリエ変換に従って振幅と位相を制御するコンピュー

E-mail: hirose-ka@crl.hpk.co.jp

ターホログラムの方式である．一方で，このようなホログラムを設計通り利用するためには入射光の位相が制御されたコヒーレント光が必要であり，位相の揃った平行光を作るために光学モジュール全体が大型化してしまうという課題もあった．

半導体レーザーは小型・軽量・高効率の優れた光源であるが，従来の半導体レーザーでは端面出射レーザー，垂直共振器型面発光レーザーのいずれでも共振器を波長程度より大きくすると高次モード競合が起きるため，大面積で位相の揃ったコヒーレント光の出射は困難であった．このような中，1999年に京都大学の野田らによって発明されたフォトニック結晶面発光レーザーPCSEL（photonic-crystal surface-emitting lasers）は，大面積コヒーレント発振を実現した画期的な半導体レーザーであった[5–15]．PCSELでは半導体レーザーの共振器に二次元フォトニック結晶を用いており，フォトニック結晶内で光波の群速度がゼロとなるフォトニックバンド端を利用している．バンド端では群速度がゼロのため，フォトニック結晶内部で回折によって生じた基本光波は対向する光波と互いに干渉して定在波を形成し，この定在波がレーザー共振器全体にわたって保たれるので大面積コヒーレント発振を実現することが可能になった．さらに，野田らはフォトニック結晶を構成する孔の形状[7,8]や配列[9,10]などの制御により共振器の電磁界分布を直接制御し，偏光やビームパターンが変えられることを示してきた．また，ビームパターンの連続的な偏向制御[11]，高出力化[12–15]などの目覚ましい成果を示してきた．

これらのフォトニック結晶面発光レーザーとホログラムの技術に基づき，われわれは，フォトニック結晶レーザーを構成する各孔の位置を所望のビームパターンの逆フーリエ変換に応じてシフトさせることで，任意の固定ビームパターンが出力可能となる自発光素子iPMSELの研究を進めてきた[16–23]．われわれが初めて実証した二次元ビームパターンの報告[16]は，面垂直方向に鋭いノイズ光をもつ点対称なパターンを伴うものであった．後者の設計ビームパターンに対して面法線に点対称な位置に現れる副次的なビームパターンは，定在波状態では面内で対向した光波が存在し，互いに逆の位相変調を受けることによる．一方で，Γ点とよばれるPCSELと同じく面垂直回折するバンド端を用いたことが要因で，面垂直ノイズ光が生じていた．他方，野田らの提案した変調フォトニック結晶レーザー[24–26]は垂直回折しないM点とよばれるバンド端を用いており，本来は面垂直方向に光出力の存在しないバンド端だが，デバイスと空気との界面での全反射が起きないライトライン内に回折させることでビームの出射方向を制御できる優れた光源であった．われわれもM点バンド端を採用し，ライトライン内にシフトするための位相と二次元パターンの位相を重ね合わせることで，面垂直方向へのノイズ光のない二次元ビームパターンを初めて実証することができた[18]．このような二次元ビームパターンは構造化照明として形状計測などの分野で用いられており，われわれも1万点を超えるドットパターンや縞パターンなどを実証してきた[19]．

二次元ビームパターンは伝搬に伴って画像が広がっていく単純な投影パターンで，フラウンホーファー回折に基づく平面波の重ね合わせで表現され，フーリエ変換に基づいて設計される．一方で，平面波は集光しないため，伝搬に伴って画像が縮小する場合のある三次元点群パターンは表現できない．このような三次元点群パターンは放物面状にゆがんだ球面波の重ね合わせで表現する必要があり，平面波に集光位相を重畳したフレネル回折に基づいて設計される[1,4]．われわれは集光位相を重畳した位相設計によって，初めて半導体レーザー単体からレンズなしで直接集光ビームが得られることを実証した[21]．興味深いことに集光ビームと同時に拡散ビームも出射されることがわかったが，これは定在波状態では面内を対向する光波が存在し，互いに逆の位相変調を受けることによる．このような直接集光技術では，多点や集光位置の異なる三次元点群パターンの出射の実証[23]だけでなく，1軸方向だけに集光する多点パターンによって従来ノイズの多かった縞パターンのノイズを抑制できることもわかってきた[22]．縞パターンのノイズは計測エラーに繋がるため，形状計測には有用な技術となる．また，このような形状計測を小型モジュールで低コストに実現するためには，汎用の回路部品に適した表面実装技術も重要となる．本稿では，iPMSELの構造化照明応用に向けた縞パターンの低ノイズ化と，実用化に向けたアレイ素子の実装事例について述べる．

2. デバイス構造と動作原理

2.1 動作原理

Fig. 1にiPMSELのデバイス構造の模式図を示す．活性層の近傍にホログラフィックに孔をシフトさせた位相変調層を設け，クラッド層で挟んだ構造となっている．iPMSELはPCSELと同様にバンド端の定在波状態を形成しているが，フォトニック結晶層の代わりに，周期的な格子点からシフトした位置に空気孔（二次元フォトニック結晶）を形成した位相変調層としている．このとき，目標ビームパターンの逆フーリエ変換で得られる位相分布に従って孔の位置をシフトさせている．孔のシフトの仕方に

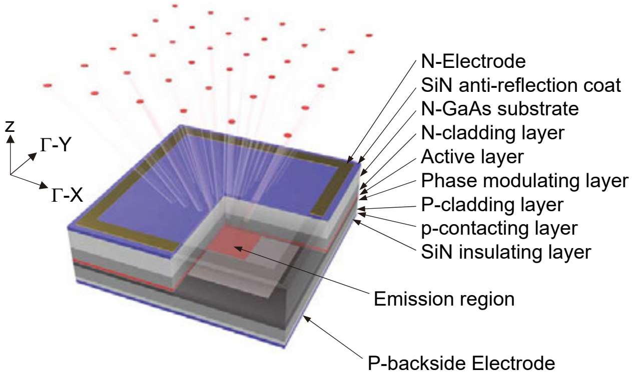

Fig. 1　Schematic of the iPMSEL.

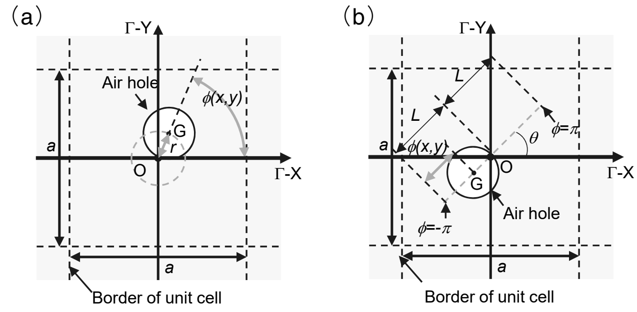

Fig. 2　Positional shift of the iPMSEL.（a）Circular shift, and（b）axial shift.

は，Fig. 2 に示すように，正方格子の格子点 O を中心とする円周上に回転する円周上シフト方式や，格子点を通る軸上を移動する軸上シフト方式がある．これによって各孔で生じる二次波面の散乱点は孔ごとにシフトされ，垂直方向に出力される平面波をホログラフィックに変調することで任意の固定ビームパターンを得ることができる．周期的なフォトニック結晶層と，孔をシフトした位相変調層の直感的な違いを Fig. 3 に示す．フォトニック結晶層では波面が揃った平面波が回折されるのに対して，孔がシフトした位相変調層ではゆがんだ波面を形成することができ，ホログラムの手法によって自在なビームパターンを形成することができる．なお，バイナリーホログラム[11, 12]では開口の位置をシフトさせるとともに，平面波であるレーザー光を外部から照射するところを，iPMSEL では PCSEL の各孔の位置をわずかにシフトさせることでレーザー発振と波面変調を同時に行うことができるため，いわば光学系のチップへの集積化が可能となる．ここでフォトニックバンド構造からの観点で補足すると，面白いことに，iPMSEL ではホログラフィックな孔変調を行うことによって，ビームパターンを構成する輝点の数だけ各輝点に対応する波数にフォトニックバンドが複製されており，これらが同一の波長で同時に発振することで，ビームパターンに対応するすべての方向に光線が向かうような発振状態が形成されている[20]．

2. 2　iPMSEL 素子の作製工程

次に，iPMSEL 素子の作製プロセスについて説明する．はじめに，有機金属気相堆積（MOCVD: metal organic chemical vapor deposition）法を用いて，N-GaAs 基板上に N クラッド層，活性層，位相変調層を結晶成長する．その後，パターニングとドライエッチングにより，位相変調層に二次元正方格子の各格子点に対して，後述する位相分布に従って位置をシフトした孔を形成する．ここで，位相変調層に用いた孔は円形で，仮想正方格子の格子定数 a は 202 nm，孔のフィリングファクター（単位格子の面積に対

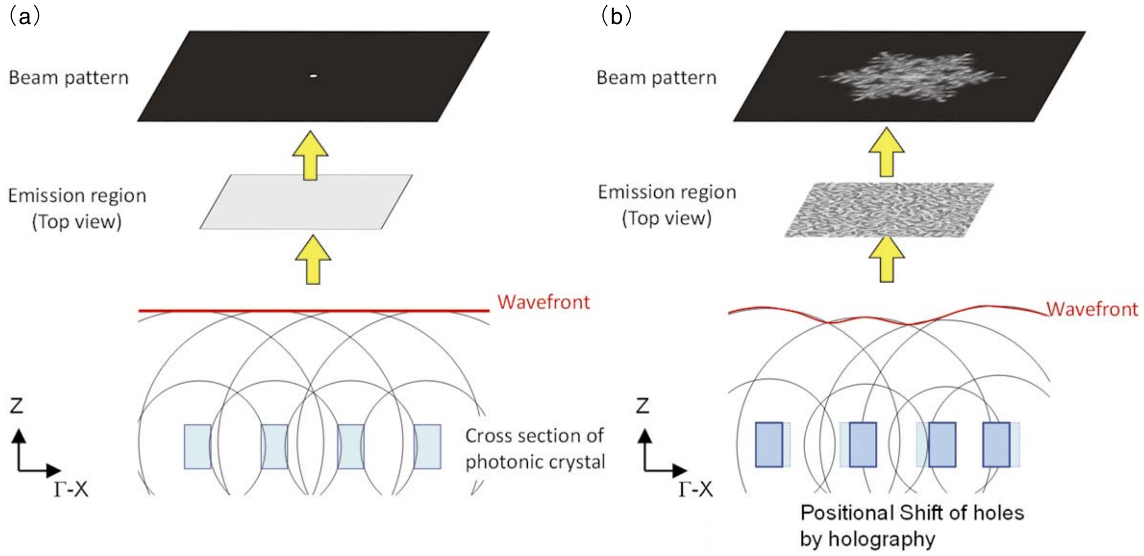

Fig. 3　Diffraction wave front in（a）photonic crystal, and（b）phase modulating layer.

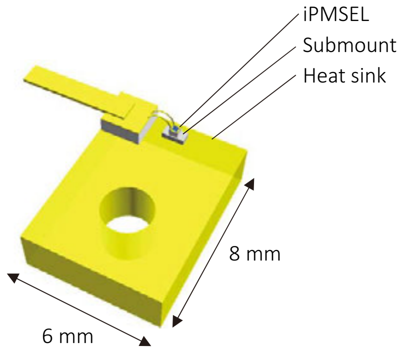

Fig. 4　OHS mounting.

する孔の面積率）は 28%，孔を形成する領域は 200 μm 角とした．また，ここでは円周上シフト方式を使い，格子点からのシフト量 r は 0.08a に設定した．位相変調層に孔を形成した後，P クラッド層，P コンタクト層を MOCVD 法で再成長させる．位相変調層では，P クラッド層を埋め込む際に形成された孔の内部では外部に比べて結晶成長速度が遅くなるため，孔の内部に屈折率差の大きい空気孔（air hole）が形成される[12]．続いて GaAs 基板の裏面側が出射面となるため，基板裏面に反射防止膜を形成し，ビームパターンの出射部に開口窓を設けた N 電極を形成する．そして基板表面の位相変調層の上部に P 電極を形成することで，デバイス構造が形成される．単一のレーザー素子として使用する場合は，Fig. 4 に模式図を示すような放熱性に優れたオープンヒートシンク（OHS）パッケージに実装することができる．

2. 3　アレイ素子と実装事例

1 mm 角以下の微小領域から直接パターンを出力できるというサイズメリットを活用するためには，モノリシックアレイ化が重要となる．ここでは，放熱性に優れた TO-8 パッケージと汎用性に優れたガラスエポキシ（以下，ガラエポ）基板上への iPMSEL モノリシックアレイ素子の表面実装について述べる．

TO-8 パッケージ用のアレイ素子を Fig. 5 に示す．このときの基本的な作製工程は 2.2 節で説明した通りであるが，表裏面から PN 電極を取るため，アレイ素子ごとにメサを形成して電極分離を行っている．なお，組立時にハンダが回り込まないように，メサの側壁には絶縁膜を形成した．ここでは 2 mm 角の中に 4×4 素子を集積化しており，各メサは 240 μm 角としてメサごとに個別の位相変調層を設定し，各メサは 300 μm 間隔で配置した．また，TO-8 ベースとの接続のために 4 mm 角の配線基板にハンダで取り付けている．TO-8 に実装した各段階の写真を Fig. 6 に示す．チップは指先に乗るサイズ，TO-8 も手のひらに十分乗るサイズで，放熱性に優れたパッケージとなる．

一方の表面実装のアレイ素子を Fig. 7（a）に示す．表面実装のため片面で P，N 電極を形成する必要がある．そのため，位相変調層の周囲 320 μm 角を残して N クラッド層

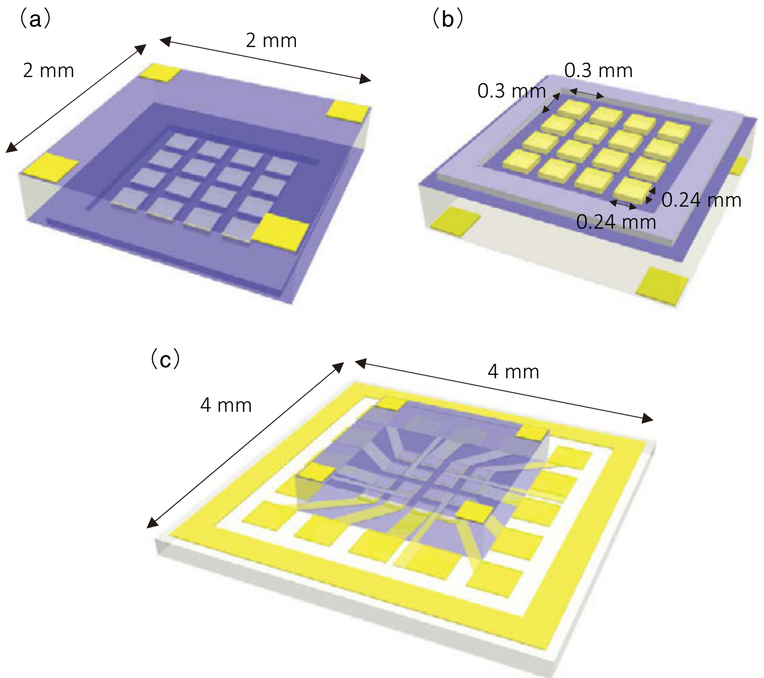

Fig. 5　TO-8 mounting.（a）Frontside（N-electrode side），（b）backside（p-electrode side），and（c）array of the iPMSELs mounted on wiring substrate for TO-8.

Fig. 6　Picture of the iPMSEL in TO-8 package.

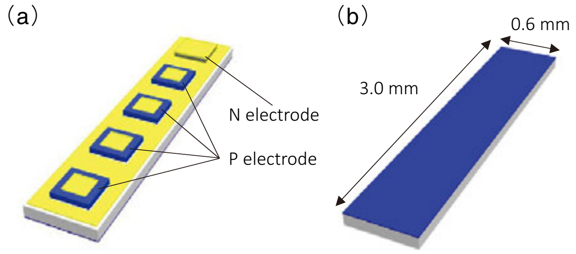

Fig. 7　Array of the iPMSEL for glass epoxy substrate.（a）Backside（electrodes side), and（b）frontside（beam emission side).

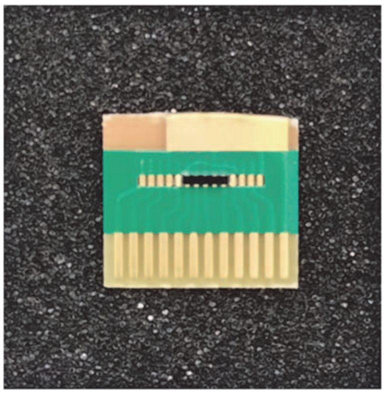

Fig. 8　Picture of array of the iPMSEL on glass epoxy substrate.

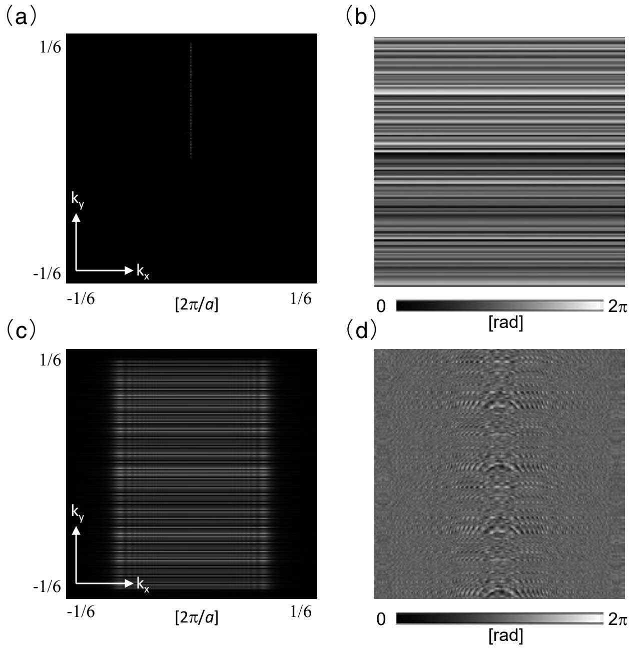

Fig. 9　Phase design of fringe pattern by direct focusing one-dimensional（1D）multi-dot pattern in the wavenumber space,（b）phase of（a),（c）fringe pattern in the wavenumber space by using 1D direct focusing, and（d）phase of（c).

の下までエッチングしてPメサおよびNメサを形成する．その後，Pメサの上部でP電極，Pメサの底部にN電極を形成する．なおN電極はメサ底部のままでは段差によって実装時に導通が取れないため，Nメサの側壁を介してNメサ上部の電極と接続する．最後に Fig. 7（b）の出射面に反射防止膜を形成し，さらに実装のためにP電極およびN電極の一部にハンダを形成して素子は完成となる．

作製した素子は Fig. 8 に示すようなガラエポ基板で，設計した銅箔配線パターン上にアレイ素子を直接ダイボンドし，続いて樹脂で素子を固定することで安定して使うことができる．このとき，ガラエポ基板は 1 cm 角程度となり，膜厚を 0.4 mm 程度とすることでカードエッジコネクターのように FPC コネクターに直接接続できるので，配線の手間を省くことができる．通常の半導体レーザー素子では専用の放熱性の優れたパッケージに実装するところを，今回の表面実装ではより実用的なガラエポ基板でマイコンによる駆動を採用しているが，ガラエポ基板であっても素子は安定に動作しており，キロヘルツオーダーで自由度の高いパターン切替が可能となる．また安価に系を構成できる点も利点となる．

2.4　位相設計

構造化照明を使った三次元計測では多点パターンや縞パターンが用いられる．中でも，縞パターンを複数回で 1 周期になるように周期的にシフトしながら計測する位相シフト法を用いることで，高精度な計測ができることが知られている[27]．今回われわれは 4 回シフトの縞パターンを採用した．

設計でははじめに，Fig. 9（a）に示すように波数空間上で等間隔に並ぶ離間した一次元多点列のパターンを設定する．ここで，波数空間は発光領域長 L に対して波数間隔 $\mathrm{d}k=1/L$ の格子からなる空間であり，今回は 4 回シフトなので $4\mathrm{d}k$ 間隔ごとに周期的に 1 輝点ずつ並んだ多点パターンを採用し，さらにそれを 1 輝点ずつシフトすることでできた 4 種類の多点パターンを用いている．なお，iPMSEL では共振器内の対向する光波によって点対称パターンが出射されるため，多点列は左右の片側だけでよい．多点を離

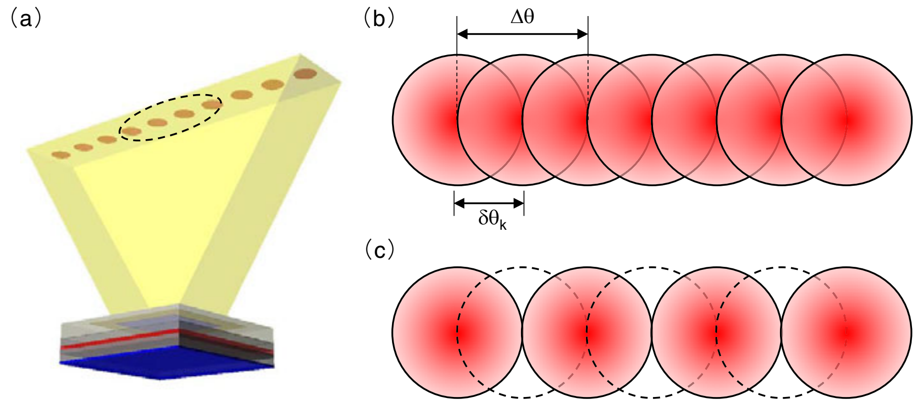

Fig. 10 (a) Schematics of the dot line pattern near the surface normal. (b) Continuous dot line with the ideal beam divergence Dq in wave number space, and (b) that having pitch of 2 pixels.

間するのは，多点同士が密集することで隣接する輝点同士が不規則に干渉して縞パターンにノイズパターンを生じるためである[22]．このビームパターンを逆フーリエ変換することで，共振器面での位相分布 φ_{Dot} が求まる．実際の位相ホログラムの設計では Gerchberg-Saxton（GS）法などの反復法を用いる[28–30]．なお，垂直回折しない M 点バンド端では，面外に取り出すために面垂直方向に回折中心をずらすためのシフトベクトルによる位相分布 $\varphi_{\mathrm{Sht}}(x, y) = (\pi/a)(\mathrm{n}_x a + \mathrm{n}_y a)$ を加える．ここで a は格子定数，x, y 方向の $\mathrm{n}_x, \mathrm{n}_y$ は仮想的な正方格子の番号に対応する．この位相分布は，フーリエ変換のシフト則に対応して面内方向に進む光波の中心方向を面垂直方向に回折させる役割となる．このときの多点パターンは，位相分布を Fig. 9（b）に示すように，一次元的なパターンとなる．一方で，この多点列の並びに直交する方向に引き伸ばして縞パターンにする必要がある．そのためパターンを引き伸ばす方向に沿って焦点距離 0.2 mm の 1 軸集光位相を重畳する．この位相は $\varphi_{\mathrm{F}}(x, y) = -\pi y^2/(\lambda f)$ で近似される．以上の位相を重畳することで縞パターンの位相は $\varphi = \varphi_{\mathrm{Dot}} + \varphi_{\mathrm{Sht}} + \varphi_{\mathrm{F}}$ と得られる．この位相分布に対応する共振器の光波は exp (iφ) と表され，これをフーリエ変換することで波数空間のビームパターンが得られる．最終的に得られた縞パターンを Fig. 9（c）に，そのときの位相分布 φ を Fig. 9（d）に示す．今回の設計では，縞パターンは波数空間で格子定数 a に合わせて $2\pi/a$ で規格化した規格化波数では縦±0.1，横±0.15 の広がりをもつが，これは面法線を通る x, y 軸上ではおよそ縦±30°，横±45° の広がり角に対応する．なお今回の縞パターンは波数空間上で等間隔になるように設計したため，球面上に等間隔に投影されるパターンとなっており，平面スクリーンへ投影したときには外周部にゆがみを生じるパターンとなる[19]．ただし，面法線に対して±30° 程度の角度では比較的まっすぐな縞パターンとして利用することができる[22]．

では，なぜ二次元ホログラムではなく前述した各点列を引き伸ばした縞パターンを用いるのか．以下に理由を説明する．はじめに Fig. 10 (a) のような多点パターン列を考え，隣接する点同士の角度間隔とビーム広がり角を考える．発光部（近視野像）の電磁界に対して遠視野像はフラウンホーファー回折によってフーリエ変換の関係となり，近視野像が実空間に対応するため，遠視野像は逆数からなる波数空間で考える必要がある．隣接点の距離は波数空間における 1 画素間隔 dk に対応し，発光領域長 L に対して $\mathrm{d}k = 1/L$ となる．波数 $k = 1/\lambda$ であるため，面垂直方向近傍の隣接点の角度間隔 $\delta\theta_k$ は $\delta\theta_k = \sin^{-1}(\lambda/L)$ となる．一方で，矩形開口の開口回折による広がり角 $\Delta\theta$ は $\Delta\theta = 2\tan^{-1}(\lambda/L)$ となる．波長 940 nm，発光領域長 200 μm 角で上記の式で考えると，面垂直方向近傍の隣接点の角度間隔 $\delta\theta_k$ は 0.27°，ビーム広がり角 $\Delta\theta$ は 0.54° となり，これは隣接点の角度間隔の 2 倍程度となる．そのため，連続的に並んだ輝点では Fig. 10（b）に示すように隣接点と干渉を起こすため，この干渉を避けるためには，Fig. 10（c）のように少なくとも 1 点ずつ間引いて配置する必要があることがわかる．なおレーザーのビーム品質 M^2 が一般に 1 以上の値となることを考えると，広がり角は M^2 に比例して増加するので，より干渉が起きやすくなる．なお，$M^2 = 1$ は理想的なガウシアンビームに対応する．ここで，方形波状のビームパターンに対して，密集した輝点列と間引いた輝点列を実測した遠視野像を Fig. 11 で比較する．室温パルス駆動で，駆動電流 500 mA，パルス幅 50 ns，デューティー1% で駆動している．Fig. 11 において，(a) は連続的な輝点列，（b）はチェッカーボード状に間引いた輝点列，（c）は x, y 方向ともに 1 画素ずつ間引いた輝点列となる．

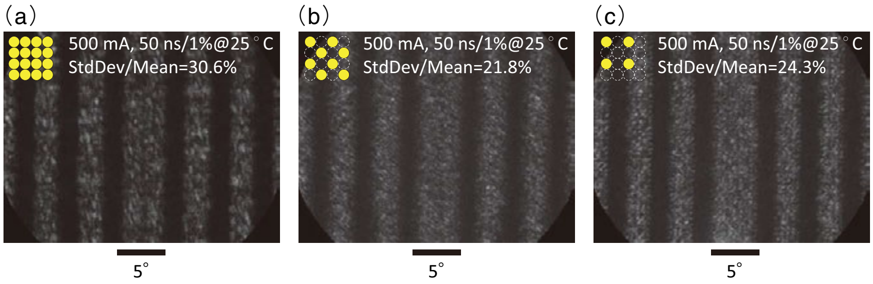

Fig. 11　Far field pattern of square wave pattern with（a）continuous dot,（b）checkerboard-like dot, and（c）dot having pitch of 2 pixels in x and y axis. Schematics of dot alignments are also depicted.

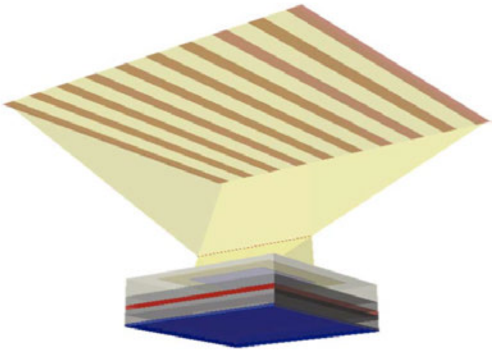

Fig. 12　Fringe pattern using 1D direct focusing.

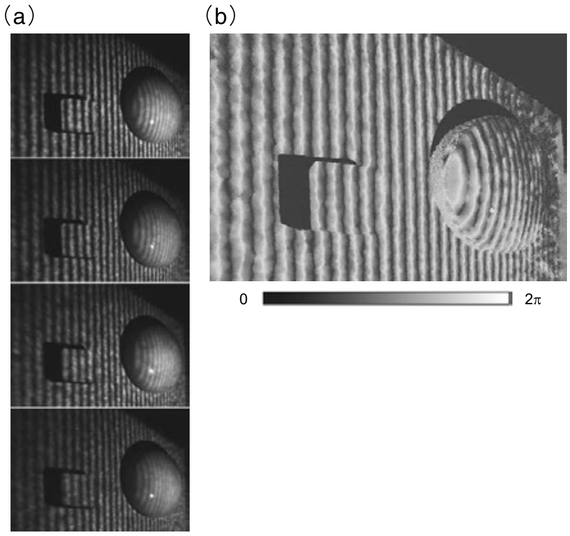

Fig. 13　Projection of fringe pattern on flat screen.（a）Pictures of the fringe pattern by 4 phase shifting, and（b）result of the phase analysis.

このとき方形波の一定の領域で輝度の標準偏差を平均値で割った割合は，Fig. 11（a），（b），（c）でそれぞれ 30.6%，21.8%，24.3% となり，輝点を適度に間引いたほうが輝度のむらが改善することがわかる．これは干渉を抑制しているためと考えられる．ただし，連続的なパターンが必要な場合には間引きによる輝度の不連続が問題となるため，前述のような直接集光技術が必要となる．この模式図を Fig. 12 に示すが，1 軸方向に並んだ輝点列に対して，それとは直交する 1 軸方向の集光位相を重畳して輝点の並びとは直交する 1 軸方向に集光させ，集光後に拡散していくパターン光を縞パターンとして用いている．これによって輝点間の干渉を抑制した縞パターンを形成できるようになる[22]．

参考までに，今回比較に用いた従来法の二次元パターンによる縞の設計手順も説明する．はじめに，4 回シフトに対応して 4 種類の縞パターンを決める．このとき iPMSEL では対称パターンが出射されるため，縞パターンは左右の片方だけでよい．また輝点が密集することで不規則なノイズが縞に生じるため，輝点は適度に間引いている．続いて各パターンを逆フーリエ変換することで，共振器における位相分布を求める．ただし，M 点バンド端を採用しているので，シフトベクトルによる位相分布は重畳する．以上の手順で位相設計を行う．

3.　パターン照射実験

TO-8 パッケージで従来の二次元ホログラムで設計した 4 回シフトの縞パターンによる平面スクリーンの照射例を Fig. 13（a）に示す．スクリーン上には半球形のマグネットと長方形で薄いマグネットを取り付けており，長方形のマグネットには紙を貼っている．このとき，得られた画像は位相シフト法によって位相情報に換算できる．この位相情報から，三角測量の原理に基づいてキャリブレーションを行うことで三次元の形状情報に換算することができるが，今回は位相解析の結果を示す．Fig. 13（a）の 4 枚の画像で，それぞれの画素 (X, Y) において強度を I_1，I_2，I_3，I_4 とすると，位相 φ は $\varphi = \arctan\{(I_2-I_4)/(I_1-I_3)\}$ となり，全画素で一律に位相を計算することができる[27]．今回の位相計測の測定例を Fig. 13（b）に示すが，位相値が評価できていることがわかる．このとき，長方形のマグネット上部に貼った紙の隅のゆがみが強調されて表示されることがわかる．一方で，縞パターンのむらに起因して平面スク

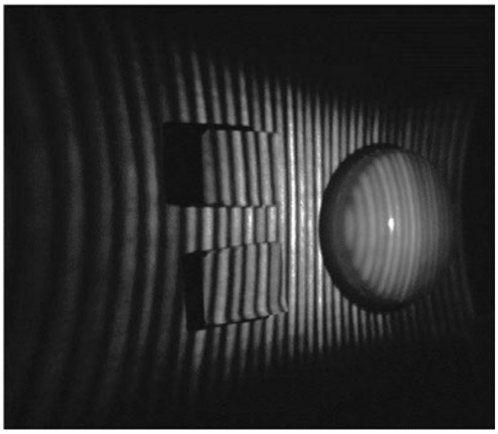

Fig. 14　Picture of fringe pattern by using direct focusing.

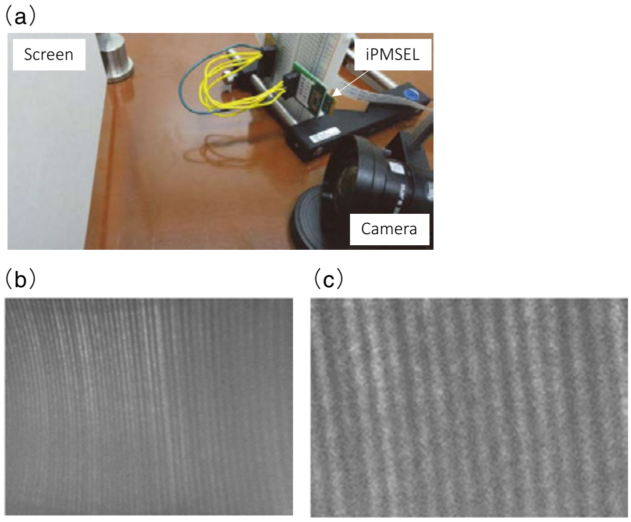

Fig. 15　Projection of fringe pattern by glass epoxy package.（a）Overview of setup,（b）picture of fringe pattern on screen, and（c）enlarged picture of（b）.

リーン上の縞状の位相値が滑らかではなく凹凸をもった結果となっているが，これは位置ずれ誤差につながるので，縞パターンのノイズを低減できることが望ましい．

続いて，直接集光技術を用いて設計した縞パターンの一例を Fig. 14 に示す．このとき縞のノイズが抑制され，従来技術に比べて 4 分の 1 程度にノイズが低減できるため，三次元形状計測の高精度化が期待できる[22]．

最後に，ガラエポ基板に表面実装した iPMSEL アレイから平面スクリーンにパターン照射した例を Fig. 15 に示す．ガラエポ基板は FPC コネクターに直接接続してマイコンでパルス駆動している．このようなパッケージであっても，ペルチェ素子などの温度制御なしで数百 mA から 1 A 程度の比較的高い電流を必要とするレーザー素子を駆動して縞パターンを照射できることがわかった．TO-8 パッケージと異なり多数のワイヤーも必要でないため，ワイヤー間の接触も起きず，組立の労力も省力化でき，さらに TO-8 パッケージで必要な専用の接続端子を必要とせず，汎用の FPC コネクターで接続することが可能となる．

4. ま　と　め

本稿では，われわれの開発している超小型パターン光源 iPMSEL の応用として，形状計測応用の例について紹介した．フォトニック結晶によって空間位相を初めて制御可能とした画期的な半導体レーザー PCSEL の技術をベースとして，われわれは iPMSEL を開発し，さまざまなビームパターンへの展開を図ってきた．二次元パターンの実証から始まり，直接集光，三次元点群パターンと続けてきた．一方で，産業応用のためには実用的なビームパターンの実証も必要となる．一例として，形状計測では構造化照明が用いられ，この中でも高精度の計測によく用いられるパターンとして縞パターンがある．しかしながら，従来の二次元ホログラムの手法で iPMSEL を設計すると，縞パターンに不規則なノイズが生じることがわかった．これは縞パターンが密集した輝点の集合体であり，隣接する輝点間の不規則な干渉によるものと考えられる．そのため，これを回避するために離間した多点列とそれに直交する 1 軸方向に直接集光する位相分布を与え，素子から直接低ノイズの縞パターンを出力することに成功した．この結果を踏まえて，構造化照明用の縞パターン投影モジュールを試作した．縞パターンの投影では高い位置精度で配置する必要があるためモノリシックアレイ素子を採用し，高密度で簡便に実装できる表面実装によってガラエポ基板上に実装した．試作したモジュールは，ペルチェ素子などによる温度調整機構なしでマイコンでも駆動できることがわかった．そして，簡単なパターン切替で縞パターンの切替照射ができることがわかり，小型三次元形状モジュールを実現できる可能性を示した．このような簡便な実装は放熱や電気的な安定性とはトレードオフの関係があり，実験室の環境下における精密な温度制御下でレーザー専用の駆動系を使うような素子本来の特性は発揮できなくなるものの，iPMSEL の得意分野である用途ごとにカスタマイズしてパターン光源をさまざまな状況下で提供するためには欠かせない技術になるであろう．このような技術を駆使することで，パターン光源の応用の裾野を広げていきたい．

文　　献

1）J. Goodman: *Introduction to Fourier Optics*, 3rd ed.（Roberts & Company, Greenwood Village, Colorado, 2005）.
2）B. R. Brown and A. W. Lohmann: Appl. Opt., **5**（1966）967–969.

3) A. W. Lohmann and D. P. Paris: Appl. Opt., **6** (1967) 1739–1748.
4) B. R. Brown and A. W. Lohmann: IBM J. Res. Develop., **13** (1969) 160–168.
5) M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, T. Tokuda, M. Murata and G. Sasaki: Appl. Phys. Lett., **75** (1999) 316–318.
6) M. Imada, A. Chutinan, S. Noda and M. Mochizuki: Phys. Rev. B, **65** (2002) 195306.
7) S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada, A. Chutinan and M. Mochizuki: Science, **293** (2001) 1123–1125.
8) E. Miyai, K. Sakai, T. Okano, W. Kunishi, D. Ohnishi and S. Noda: Nature, **441** (2006) 946.
9) E. Miyai and S. Noda: Appl. Phys. Lett., **86** (2005) 111113.
10) E. Miyai, K. Sakai, T. Okano, W. Kunishi, D. Ohnishi and S. Noda: Appl. Phys. Express, **1** (2008) 062002.
11) Y. Kurosaka, S. Iwahashi, Y. Liang, K. Sakai, E. Miyai, W. Kunishi, D. Ohnishi and S. Noda: Nat. Photonics, **4** (2010) 447–450.
12) K. Hirose, Y. Liang, Y. Kurosaka, T. Sugiyama, A. Watanabe and S. Noda: Nat. Photonics, **8** (2014) 406–411.
13) M. Yoshida, M. D. Zoysa, K. Ishizaki, Y. Tanaka, M. Kawasaki, R. Hatsuda, B. Song, J. Gelleta and S. Noda: Nat. Mater., **18** (2019) 121–128.
14) R. Morita, T. Inoue, M. D. Zoysa, K. Ishizaki and S. Noda: Nat. Photonics, **15** (2021) 311–318.
15) T. Inoue, M. Yoshida, J. Gelleta, K. Izumi, K. Yoshida, K. Ishizaki, M. D. Zoysa and S. Noda: Nat. Commun., **13** (2022) 3262.
16) Y. Kurosaka, K. Hirose, T. Sugiyama, Y. Takiguchi and Y. Nomoto: Sci. Rep., **6** (2016) 30138.
17) Y. Takiguchi, K. Hirose, T. Sugiyama, Y. Nomoto, S. Uenoyama and Y. Kurosaka: Opt. Express, **26** (2018) 10787–10800.
18) K. Hirose, Y. Takiguchi, T. Sugiyama, Y. Nomoto, S. Uenoyama and Y. Kurosaka: Opt. Express, **26** (2018) 29854–29866.
19) K. Hirose, H. Kamei, T. Sugiyama and Y. Kurosaka: Opt. Express, **28** (2020) 37307–37321.
20) Y. Kurosaka, K. Hirose, H. Kamei and T. Sugiyama: Phys. Rev. B, **103** (2021) 245310.
21) K. Hirose, H. Kamei and T. Sugiyama: Opt. Express, **30** (2022) 3066–3075.
22) K. Hirose, K. Watanabe, H. Kamei, T. Sugiyama, Y. Takiguchi and Y. Kurosaka: Opt. Lett., **48** (2023) 1387–1390.
23) K. Hirose, K. Watanabe, H. Kamei, T. Sugiyama, Y. Takiguchi and Y. Kurosaka: Opt. Express, **31** (2023) 17137–17147.
24) T. Okino, Y. Liang, K. Kitamura and S. Noda: "Beam-direction control by modulated photonic-crystal lasers," *Proc. of 60th Japanese Society Applied Physics Spring Meeting*, Paper 28p-C1-17 (Kanagawa, 2013).
25) T. Okino, K. Kitamura, D. Yasuda, Y. Liang and S. Noda: "Position-modulated Photonic-crystal Lasers and Control of Beam Direction and Polarization," *Proc. of Conf. Lasers Electro, Opt.*, Paper SW1F.1 (San Jose, 2015).
26) S. Noda, K. Kitamura, T. Okino, D. Yasuda and Y. Tanaka: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **23** (2017) 4900107.
27) J. Geng: Adv. Opt. Photonics, **3** (2011) 128–160.
28) R. W. Gerchberg and W. O. Saxton: Optik, **35** (1972) 237–246.
29) J. R. Fienup: Appl. Opt., **21** (1982) 2758–2769.
30) O. Ripoll, V. Kettunen and H. P. Herzig: Opt. Eng., **43** (2004) 2549–2556.