レーザープロジェクター用光変調素子
―― 回折型光変調素子を中心として ――

菊　池　啓　記

Light Modulators for Laser Projection Display

Hiroki KIKUCHI

Laser is an attractive light source for the projection display with wider color gamut, smaller etendue and longer life time, compared with conventional incandescent light sources. In Aichi EXPO (2005, Aichi, Japan), high-definition image quality, large screen size, "G×L" laser projection display was publicly demonstrated for the first time. "G×L" is based on the one dimensional MEMS light modulator, "Grating Light Valve." In this report, spatial light modulators for laser projection display (DMD, HTPS-LCD, LCOS, G×L) are reviewed. Optical properties of G×L system are discussed. Speckle reduction technique in the laser projection display is also discussed.

Key words: laser projection display, Grating Light Valve, speckle, spatial light modulator

自然界の鮮やかな色彩，奥行き感を忠実に再現した精緻な映像を，視野全体に映し出したい．こんな想いから，筆者らは愛知万博（2005年3～9月）において，"G×L"（ジー・バイ・エル）による，2005インチ（横50 m×縦10 m）スクリーンサイズのレーザードリームシアターを出展した[1]（図1）．"G×L" とは，1次元回折型光変調素子 Grating Light Valve[2]（GLV）を使用したレーザープロジェクター技術の総称である．

レーザーを光源とする色鮮やかな映像は，200万人を超える観客に，これまでにない未知の印象を与えることとなった．19世紀の映画の発明以来，万国博覧会はその時代の最先端映像システムのショーケースの場でもあったが，21世紀最初の万博において，史上はじめてレーザーを光源とする巨大映像システムを世に問うたことは，今後のレーザーおよびプロジェクター光学技術の発展の方向性を占う意味でも意義深いことではなかったかと思う．

本稿では，最近注目の高まりつつあるレーザープロジェクター光学技術について紹介する．まず，ディジタルマイクロミラーデバイス（DMD），高温ポリシリコンTFT液晶，反射型液晶，G×L素子の各プロジェクター用光変調素子の特徴と，最近の動向について紹介する．続いて，レーザープロジェクター光変調素子の一例としてG×Lを採り上げ，G×L素子の動作原理と光学技術を解説する．最後に，レーザープロジェクター光学技術において解決すべき課題のひとつである，スペックルノイズとその低減に関して，実験結果を交えて紹介する．

1　プロジェクター用光変調素子と最近の動向

1.1　ディジタルマイクロミラーデバイス（DMD）

ディジタルマイクロミラーデバイスは，Texas Instruments社によって開発された反射型空間変調素子である．MEMS（micro electro mechanical systems）技術によって形成された2次元の微小ミラーアレイの傾き角を高速に切り替えることにより，空間的な光強度変調を実現している．傾き角はオン状態とオフ状態の二値をとり，オンオフの回数を制御することにより，パルス変調での階調表現を行っている．他素子と比較して高画素化は困難といわれてきたが，最近，1920×1080画素のDMD素子が発表された．レーザープロジェクター用の光変調素子としても検討が進められており，レーザーを光源とするリアプロジェク

ソニー株式会社コアテクノロジー開発本部レーザ応用開発部（〒141-0001 東京都品川区北品川6-7-35）　E-mail: Hiroki.Kikuchi@jp.sony.com

ションディスプレイがデモンストレーションされている[3]．

1.2　高温ポリシリコン TFT 液晶（HTPS LCD）

データプロジェクターやリアプロジェクション TV 用途として幅広く採用されているものが，高温ポリシリコン TFT 液晶である．素子の裏面から照明する透過型の構成のため，光学系のレイアウトがシンプルになることが特徴である．画素間を配線が通るため，開口率が小さくなるという課題があるが，画素に対応したマイクロレンズアレイで光取り込み効率改善がなされている．最近，無機液晶配光膜の採用による，素子の耐光性の改善と，大幅なコントラストの改善が報告されている．

1.3　反射型液晶（LCOS）

反射型液晶は，CMOS シリコン基板上に形成された駆動回路上に液晶をガラス封止する構成をとる．透過型と比較しての反射型液晶の特徴として，

- 画素間スペースが狭く，高開口率であり，また画像のメッシュ感が小さい
- 液晶配向膜間隔が短く，高速応答が可能である

などが挙げられる．液晶デバイスでありながら，最高 2.5 ms の変調（立ち上がり）速度を示す．最近，ディジタルシネマ用途として，4096×2160 画素数まで高画素化が実現している．民生用途においても，高画質リアプロジェクター用素子として，最近発展の著しいデバイスである．

1.4　G×L（Grating Light Valve, GLV）

G×L 素子は，スタンフォード大学において原理考案された，1 次元回折型光変調素子（Grating Light Valve）をベースとしたディスプレイデバイスである．画素数は縦 1080 画素で，1 画素は 6 本の微小リボンから構成される．そのうち，交互に 3 本のリボンが静電力により変位し，正反射状態と回折格子状態の両状態をとることにより，光変調素子としての機能を実現している．画素領域は約 27 mm×25 μm で，エタンデュが他変調素子と比較して小さいため，おのずとレーザー光での照明が前提となる．1 次元画像の走査により 2 次元画像が表示されることが最大の特徴であり，投影像のアスペクト比が可変であるなど，従来のデバイスにはない機能を備えている．

2.　G×L レーザープロジェクター

本章では，レーザープロジェクターの代表例として G×L を採り上げ，その動作原理を解説する．まず，素子の変調特性を導出して，ディスプレイ用途として適した暗部階調再現性を有していることを示す．次に，素子コントラスト改善のための手法を解説し，光学エンジン構成の概要を紹介する．

2.1　G×L 素子の変調特性

図 2 に，G×L 素子の断面形状を模式的に示す．ここで，r はリボン幅，g はリボン間のギャップ間隔，$\Lambda=2(r+g)$ は回折格子の周期，$p=3\Lambda$ は 1 画素長を示す．印加電圧 V と可動リボンの変位 δ_v の関係は，リボンの張力によるフック力 $F=k\delta_v$ と静電力 $F=\beta V^2/(d-\delta_v)^2$ がつりあうとして，以下のようにモデル化できる．

$$V\propto\sqrt{\delta_v(d-\delta_v)^2} \qquad (1)$$

G×L 素子の複素振幅反射率を以下のように表す．

$$u(\xi)=\begin{cases}\sqrt{R_r}\exp(i\phi_r) & \text{固定リボン}\\ \sqrt{R_r}\exp(i\phi_r)\exp\left(i\dfrac{4\pi\delta_v}{\lambda}\right) & \text{可動リボン}\\ 0 & \text{ギャップ}\end{cases} \qquad (2)$$

ここで，R_r はリボンの反射率，ϕ_r は固定リボンの反射による位相シフトである．ギャップの反射率はゼロとしている．ξ は G×L 素子上における座標系を表す．反射光の光線角度分布は，以下のように表される．

$$|U(\theta)|^2\propto\left|\int_{-\infty}^{\infty}d\xi\exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}\theta\cdot\xi\right)u(\xi)\right|^2 \qquad (3)$$

全画素変調時においては，G×L 素子は無限に連なる周期 Λ からなる回折格子とみなしてよい．フーリエ面における光線分布は，式（3）より $\theta_N=N(\lambda/\Lambda)$（$N$：回折次数）の回折角に集中する．リボン変位量に対しての各回折光の強度は，式（2）（3）より図 3 左のように計算される．この計算例において，リボンの反射率を $R_r=90\%$，リボンの開口率 $\mu=r/(r+g)$ を 86% としている．$\delta_v=\lambda/4$ のリボン変位量において，±1 次回折光強度が最大（効率 70%）となり，0 次回折光が消失する．

式（1）を用いて，図 3 左を電圧と回折光強度（I-V 特性）の関係に換算して再プロットすると，図 3 右のようになる．±1 次回折光を映像信号光として選択することにより，電圧信号に対して緩やかに暗部階調が変調される，ディスプレイとして好適な γ 特性の光変調特性が得られることがわかる．パルス時間幅変調型の素子と比較して，G×L が暗部の微妙な階調表現にすぐれているとされるゆえんである．他方，0 次回折光は電圧に対して急峻な変調特性を示す．G×L を，通信デバイスなどディジタル的な変調特性が要求される用途に使用する場合は，0 次回折光を信号光とすることが望ましい．

2.2　シュリーレンフィルターによる回折光分離

G×L 素子からの出射光のうち，特定次数の回折光のみ選択的に透過させる機能をシュリーレンフィルターとよんでいる．式（3）より計算される回折角度分布より，シュリーレンフィルターの開口形状が決定される．図 4 左に，

図1　愛知万博グローバルハウスレーザードリームシアター．

オンとオフの画素が繰り返す周期パターンにおける，回折光分布の計算結果を示す．リボンによる回折に加えて，2画素（6Λ）を周期とする回折がサイドローブとして，各回折光の両側に現れている．また，RGB の波長ごとに異なる回折角をすべて分離するためには，シュリーレンフィルターの開口幅をさらに広げる必要がある．

投影画像のコントラストを高めるためには，可能な限りシュリーレンフィルターの開口幅を狭くすることが望ましい．そこで，図5に示すようなブレーズ構造の G×L 素子を新規に開発し，RGB 各波長において+1次回折光強度を−1次光の約9倍まで高め，+1次光のみを選択することとした[4]．さらに，照明光を斜め入射することにより，RGB 各色の1次回折光の伝播方向を光軸方向と一致させ，

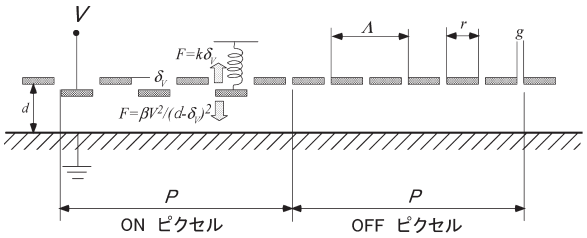

図2　G×L 素子のリボン断面構造図．

図4右に示すように，シュリーレンフィルターの開口幅を従来の半分以下まで狭くすることが可能となった．この結果，変調効率を維持しながら，コントラストを大幅に高めることに成功し，空間光変調素子としては他に例をみない，10000：1を超える素子コントラストを実現した．

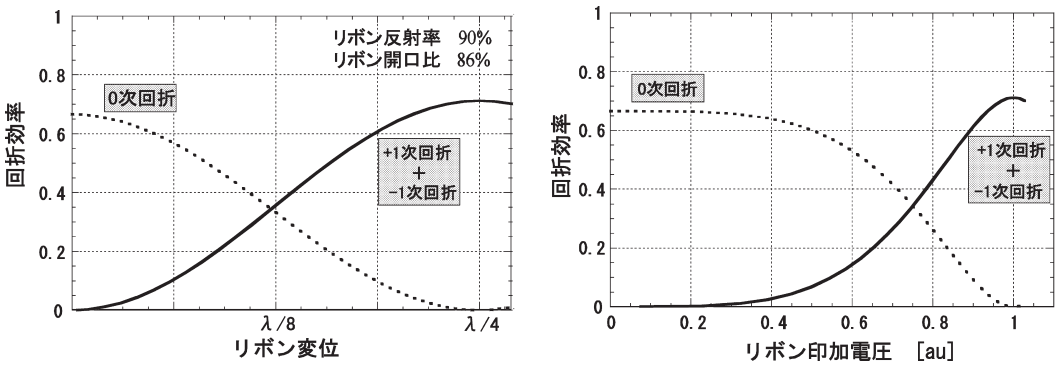

図3　G×L 素子変調特性．左図：リボン変位量 vs. 回折効率，右図：リボン印加電圧 vs. 回折効率．

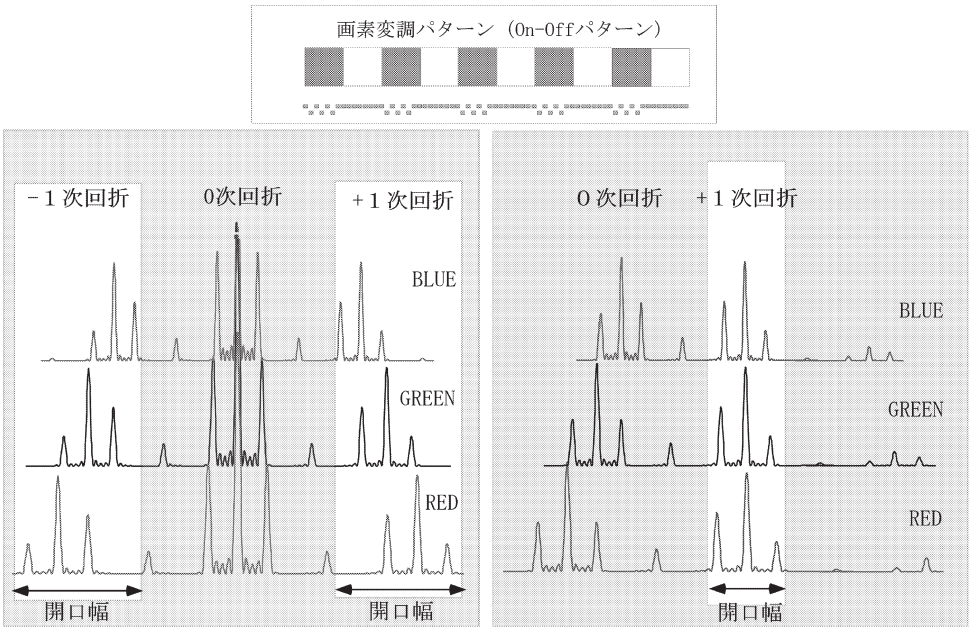

図 4　オン-オフパターンにおける回折光の角度分布とシュリーレンフィルター開口形状．左図：通常型 G×L，右図：ブレーズ型 G×L．

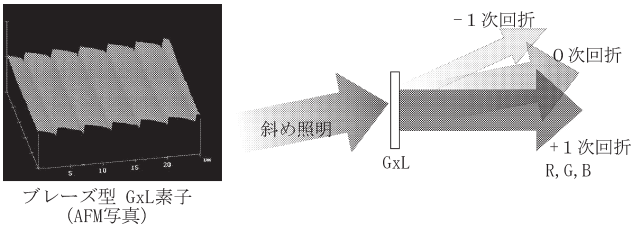

図 5　ブレーズ型 G×L 素子の原子間力顕微鏡写真と斜め照明．

2.3　G×L 光学エンジン構成

図 6 に，G×L 光学エンジンの構成を示す．G×L 素子の 1080 個の画素は紙面垂直面内に並び，横スキャンによって，1920×1080 画素の 2 次元映像がスクリーンに投影されているものとする．レーザー光を縦 27.5 mm，横 25 μm の線状の均一強度分布ビームに整形して G×L 素子に照明する．RGB 各色の G×L 素子からの反射光および回折光は，色合成フィルターで合成されたのち，オフナーリレーとよばれる反射型等倍リレー光学系に入射する．オフナーリレーは凹面鏡（主鏡）と，主鏡の半分の曲率半径の凸面鏡（副鏡）から構成され，回折限界に近い性能で 1 次元像を等倍結像する．また，副鏡位置での開口制限によって，シュリーレンフィルターの機能も果たしている．1 次元中間像位置には，迷光カットのためスリットを設置する．2 次元リレー光学系（2D-OP）は，1 次元中間像を 2 次元中間像に変換する機能をもつ．2 次元中間像を形成することによって，投影像の画歪みを抑制している．

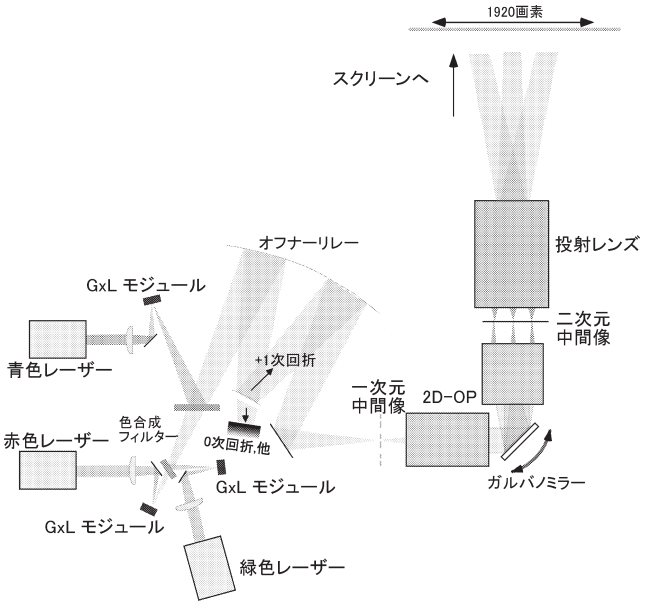

図 6　G×L 光学エンジンの構成．

愛知万博に出展したプロジェクターは，5000 ルーメン相当の明るさを実現している．点光源であるレーザーを光源とすることの特徴のひとつとして，光学系の F ナンバーの制約を受けることなく，レーザーの本数の追加によりルーメン数を明るくすることが可能であることも挙げられる．

3. レーザーディスプレイにおけるスペックル低減

スペックルとは，レーザーの干渉性に起因する，網膜上で画像に重畳される粒状ノイズである．スペックルの問題は常にレーザーディスプレイ実現の障害となってきたが，G×L システムにおいては，ほとんど認知できないレベルまでスペックルノイズを低減することに成功している．本稿を締めくくるにあたって，G×L に導入されているスペックル低減技術に関して報告する．

スペックルの強度（スペックルコントラスト）C_S は，スペックル像輝度分布の空間平均と標準偏差の比で表される．ランダム物体をコヒーレント光で照明した際，スペックルコントラストは C_S＝100％ となる．

さて，網膜に形成されるスペックルの形状は，照明光の諸特性と物体（スクリーン）の波長オーダーの微細構造によって決定される．スペックル低減のためには，観察系（人間の目）の時間的，空間的分解能の範囲内に，可能な限り多数の独立なスペックルパターンを発生させ，平均化させればよい．N 枚の独立なスペックルパターンにより，コントラストは $C_S=100/\sqrt{N}$ [％] まで低減する．ここで，「独立なスペックル」とは，形状が互いに「無相関」であることに加えて，スペックル像が互いに「非干渉」で，像の合成が強度加算によってなされることを意味している．

3.1 偏光多重によるスペックル低減

1 本のレーザー光を直交する 2 偏光に分離し（p 偏光，s 偏光とする），さらに互いに可干渉距離以上の光路長差をつけたのちに，再度合成して，G×L 素子に照明する．スクリーンに偏光解消作用があるならば，p 偏光の照明成分は，スクリーンにおいて p 偏光の散乱成分（pp 散乱と略す）と s 偏光の散乱成分（ps 散乱）へ散乱される．s 偏光照明も同様に，sp 散乱と ss 散乱へ散乱される．ここで，pp 散乱と sp 散乱は同じ偏光でありながら，照明光の段階で可干渉距離以上の光路差がつけられていたため，互いに干渉性を有さない（s 散乱に関しても同様）．よって，4 通りの散乱光は網膜上に，無相関形状かつ非干渉の 4 通りの独立スペックルパターンを同時に発生させることとなり，網膜上での平均化作用により，スペックルコントラストは $1/\sqrt{4}$ 倍に低減される．照明光の偏光状態を問わないという G×L 素子の特徴を生かして，効率のよいスペックル低減が可能である．

3.2 光源広がりとスキャニングによるスペックル低減[5)]

図 7 のように，投射レンズの射出瞳を光源サイズとみなし，光源がスクリーンを照明し，観察系（人間の目）が網膜上にスクリーン像を結像するシステムを考える．

観察系の解像距離（レイリー限界）はおよそ，$L\sim\lambda/\Omega_{eye}$ と表される．ここで Ω_{eye} は，人間の目がスクリーンを見込む角度である．一方，有限の広がりをもつ光源の，スクリーン面における波面の相関長 l_c は，ファンシッター・ツェルニケの定理より，光源がスクリーンを見込む角度 Ω_{proj} を使って，$l_c\sim\lambda/\Omega_{proj}$ と表される．

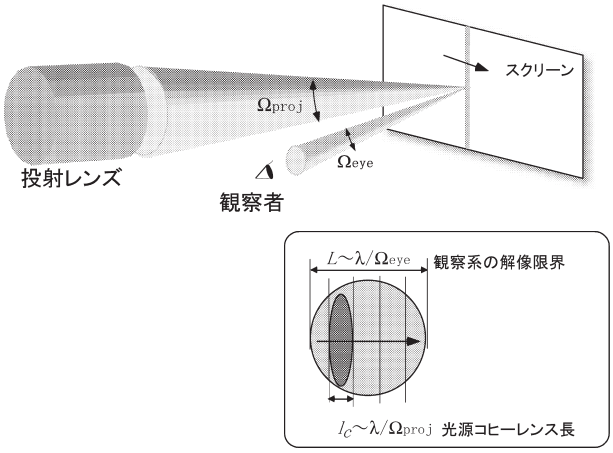

図 7　光源広がりとスキャニングによるスペックル低減．

インコヒーレントな熱光源であるならば，光源は，およそ $M=(L/l_c)^2=(\Omega_{proj}/\Omega_{eye})^2$ の個数の点光源の集まりとみなせるであろう．レーザーの場合は，これら点光源の位相状態は互いに無相関であっても，その状態は時間的に変化しない．そのため，点光源によって形成されるおのおののスペックルパターンは，形状無相関ながらも，互いに干渉性を有し，平均化によるスペックルコントラストの低減は得られないはずである．

ところが，1 次元光変調素子からなる G×L システムにおいては，2 次元画像投影のために，ビームをスクリーン上で横方向にスキャンする．このため，少なくとも 1 次元的には，スペックルパターンのアンサンブル平均が時間軸上でなされ，スキャニングによるスペックルの低減効果が得られる．独立スペックルは $M=(\Omega_{proj}/\Omega_{eye})$ の枚数だけ得られ，スペックルコントラストは，$C_S=100/\sqrt{M}=100\sqrt{\Omega_{eye}/\Omega_{proj}}$ [％] まで低減する．

スペックル低減効果を高めるためには，Ω_{proj} を大きく，いいかえれば投射系の F ナンバーを明るくすることが有効である．そこで，図 6 における 1 次元中間像位置にディフューザーを設置した．ディフューザー面は中間像位置と正確に一致しており，画質を劣化させることなく，ディフューザー以降の光学系 F ナンバーを明るくすることができる．

3.3 測 定 結 果

図 8 に，スペックルコントラストの測定結果を示す．人

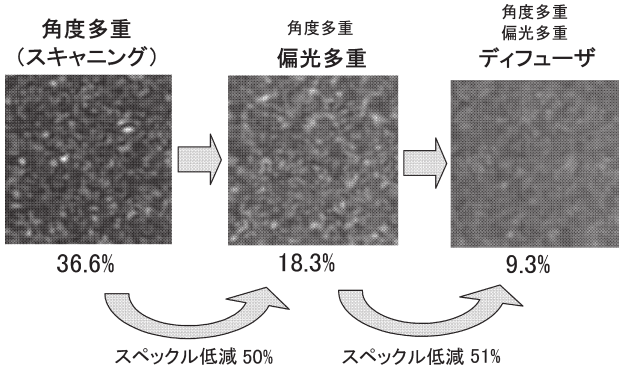

図8　スペックル低減の定量測定．

間の目を模した結像系で，CCD 面上にスペックルパターンを発生させ，そのコントラストを数値評価した．測定は，単一波長の緑色レーザー（波長 532 nm）で行った．ガルバノスキャン，偏光多重，ディフューザーの 3 手段の導入により，最終的に 10% 以下まで，相乗的にスペックルコントラストが低減されたことを確認した．

万博期間中の上映を通じて，スペックルノイズを指摘する声はほとんど聞かれなかった．両偏光照明と 1 次元スキャニングという G×L 特有のスペックル低減手段により，レーザーディスプレイにおけるスペックルの問題はほぼ解決されるものと考えている．

以上，G×L を中心として，レーザープロジェクターの最近の動向について紹介した．レーザーは，広い色再現性，光源寿命，光源輝度の観点から，プロジェクター用光源として理想的な性能を有し，プロジェクションディスプレイに新たな活況をもたらすものと期待されている．かつ G×L は，高コントラスト，高速応答，階調表現性，スペックル低減など，ディスプレイ用光変調素子として最適な性能を有すると同時に，スキャニングの振り角を広げることによりアスペクト比が可変であるなど，従来型の素子にはない特徴を有している．

可視波長域のレーザーの最近の発展とあいまって，今後ますます，レーザープロジェクターの発展が期待される．

文　　献

1）江口直哉：“レーザードリームシアター”，映像情報インダストリアル，Sep.（2005）21–25.
2）D. M. Bloom: “The Grating Light Valve: Revolutionizing display technology,” Proc. SPIE, **3013**（1997）165–171.
3）J. L. A. Chilla, H. Zhou, E. Weiss, A. L. Caprara, Q. Shou, S. V. Govorkov, M. K. Reed and L. Spinelli: “Blue & green optically-pumped semiconductor lasers for display,” Proc. SPIE, **5740**（2005）41–47.
4）H. Tamada, A. Taguchi, K. Oniki and Y. Ito: “High contrast and efficient blazed grating light valve for full-HD 5,000 lumen laser projectors,” *Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics*（IEEE, 2006）pp. 133–134.
5）J. W. Goodman: “Some fundamental properties of speckle,” J. Opt. Soc. Am., **66**（1976）1145–1149.

（2006 年 1 月 10 日受理）