
プリンタ用780nm帯40ch光書き込みVCSELアレイの開発

780nm-range 40 Channels VCSEL Array for Printers

軸谷 直人*	原 敬*	伊藤 彰浩*	庄子 浩義*	上西 盛聖*
Naoto JIKUTANI	Kei HARA	Akihiro ITOH	Hiroyoshi SHOUJI	Morimasa KAMINISHI
本村 寛*	原坂 和宏*	菅原 悟*	佐藤 俊一*	
Hiroshi MOTOMURA	Kazuhiro HARASAKA	Satoru SUGAWARA	Shunichi SATO	

要 旨

本論文ではプリンタの書き込み光源として開発した780nm帯40チャンネル面発光型半導体レーザ (VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting Laser) アレイについて報告する。本VCSELアレイは、信頼性に有利な、Alを含まない圧縮歪GaInPAs量子井戸活性層と傾斜基板と異方性高次モードフィルタにより、偏光単一方向制御と大きなシングルモード出力を達成した。また、多層膜反射鏡の一部に設けた放熱構造によって、発熱による特性劣化を大幅に改善し、高出力での安定動作を実現した。以上から、長期信頼性に優れた、高密度で高速書き込みが可能なVCSELアレイを実現した。

ABSTRACT

We have succeeded to develop 40-channel VCSEL array which makes writing unit in RICOH digital printer having good reliability, high-speed printability and high-density writing performance. A compressive-strained Al-free GaInPAs active layer and a new anisotropic higher transvers mode filter have been developed to achieve high-power single-mode operation and well-controlled polarization stability, individually. A new thermal design of bottom multi-layer reflector improved many laser characteristics such as maximum power, thermal cross-talk and long-term reliability due to a drastically reduction of thermal resistance.

* 研究開発本部 東北研究所
Tohoku R&D Center, Research and Development Group

1. 背景

近年高画質で高速なレーザプリンタの要求が非常に高まってきている。また、レーザプリンタの書き込みにおけるキーデバイスとして、面発光型半導体レーザ（VCSEL：Vertical Cavity Surface Emitting Laser）が注目されている。VCSELは1977年に東京工業大学 伊賀教授により考案された日本発の新しいレーザデバイスで、従来の端面発光型半導体レーザとは異なり、基板面に対して垂直方向に共振しレーザビームが放射されるという特徴を有している。この為、端面発光型半導体レーザでは実現する事が難しかった高密度2次元アレイが比較的容易に作製できるので、高速、高密度な光書き込み光源として近年実用化がなされている¹⁾。我々は、長期信頼性が高く、シングルモード出力や偏光特性等のレーザ特性に優れ、プリンタ向け仕様に対応した、高密度で高速書き込みが可能な40チャンネルVCSELアレイを開発したので、本稿で報告する。

2. 素子構造

VCSELアレイは構造的に高速、高密度な書き込みに適しているが、より高速な光書き込みを実現するには、素子の出力が高い事が望まれる。また、濃度ムラの無い優れた画質を実現する為には、アレイを形成する個々のチャンネル間の熱クロストークが低くて出力等のばらつきが小さく、更に各チャンネルの偏光方向が同一方向に安定に制御されている必要がある。更に、高密度アレイを形成した場合においても優れた長期信頼性を備えている必要がある。我々は、これらの特性項目を重要課題に設定し、放熱構造、GaInPAs活性層、傾斜基板、及び異方性モードフィルタを採用する事で、上記の特性値に優れたVCSELアレイを実現した。Fig.1は、780nm帯に感度を有する感光体用に開発した40チャンネルVCSELアレイの上面写真である。VCSELアレイを形成したチップは、セラミック・パッケージ上にマウントされており、各チャンネル毎に配線が引き出されワイヤボンダが施されている。また、40チャンネルのVCSEL素子は、約 0.1mm^2 の範囲に集積されて

おり、写真はこれらが同時点灯している様子を撮影したものである。アレイが 4×5 の2つのブロックから構成されているのは、レンズ系とのカップリングを考慮した結果である。

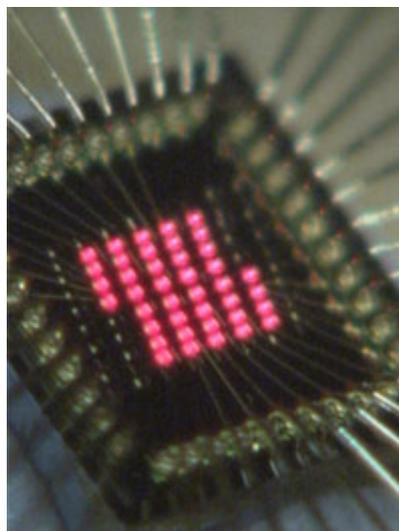


Fig.1 Top view of 40ch-VCSEL array.

Fig.2はアレイの各チャンネルを構成する酸化狭窄型VCSEL素子の断面を示したものである。VCSEL素子は[111]A方向に 15° 傾斜したn導電型のGaAs (n-GaAs)半導体基板の上に、MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 法によってエピタキシャル成長されている。

次に素子の構成と作製方法について説明する。Fig.2のVCSELは、GaAs基板上に基板側多層膜反射鏡が設けられている。多層膜反射鏡はn-AlAs/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ からなる分布ブラッグ反射器 (DBR：Distributed Bragg Reflector) によって構成されている。DBRの各層はその層における光の波長の $\lambda/4$ の厚さに構成されており、界面における光波の多重反射により高い反射率が得られる。また、基板側多層膜反射鏡の一部には、発熱による特性劣化を改善する為に放熱構造を設けている。基板側多層膜反射鏡の上に、GaInPAsを活性層、GaInPをバリア層とした三重量子井戸活性層 (TQW：Triple Quantum Well) をAlGaInP共振器スペーサー層により上下に挟んだ共振器領域を設けている。傾斜基板を用いた事によりAlGaInP材料で問題になる丘状欠陥と自然超格子の形成が抑制されている。

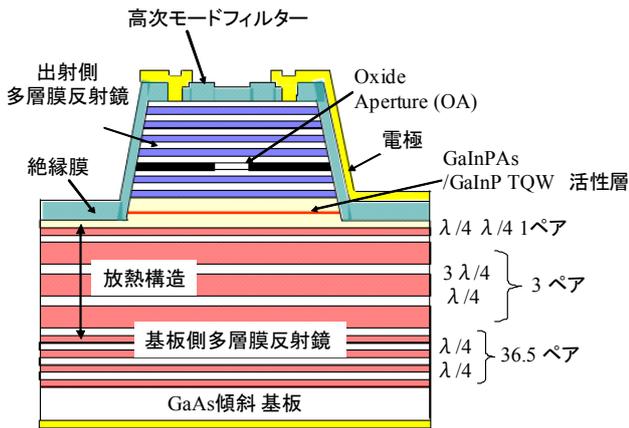


Fig.2 Cross sectional view of VCSEL.

そして、この上にp-Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.3}Ga_{0.7}Asよりなる出射側多層膜反射鏡とp-GaAsコンタクト層を設けた。また、出射側多層膜反射鏡の途中にp-AlAs被選択酸化層を設けた。以上の構造を結晶成長した後、Fig.2の様にドライエッチングにより共振器領域の途中までの各層を除去し、矩形のメサポストを形成し、高温の水蒸気雰囲気中において、エッチングにより露出させたメサの側面から素子中心部を残しAlAs被選択酸化層を酸化する。酸化層は電氣的に絶縁体であり、屈折率も周辺半導体に比べて小さいのでキャリア（正孔）とレーザの横モードを素子の中心部に閉じ込め、酸化アパーチャー（OA：Oxide Aperture）構造が形成される。この後、層間絶縁膜と電極を形成しているが、この際にシングルモード出力を向上させる為に、素子表面にSiNよりなる誘電体高次モードフィルタを設けている。

3. 活性層材料について

一般に780nmから850nm帯における活性層材料としては、結晶成長が容易なAlGaAs材料がよく用いられている^{1,7)}。しかしながら、Alは化学的に活性であり、結晶成長時の雰囲気中に残留する酸素がAlと反応して活性層中に取り込まれ易く、酸素が取り込まれた場合には発光効率が低下し、長期信頼性に影響を及ぼす問題がある。一方で、赤色レーザの活性層材料としてGaInP材料が広く用いられている。GaAs基板に格子整合するGaInP材料は658nmの発光波長を有するが、As

を組成に加えると発光波長が長波長化し、およそ850nm程度までの波長帯をカバーする事が可能である。GaInPをバリア層としたGaInPAs/GaInP量子井戸構造により、780nmの発光をAlフリーで実現できる為、長期信頼性の点で有利であり、この波長帯におけるレーザが報告されている^{2,3)}。GaInPAs活性層は組成を調整する事により格子定数が増え、780nm帯において活性層に圧縮歪み応力を加える事ができる。圧縮歪み応力により結晶格子が変形するとバンド構造が変化し、価電子帯頂上における重い正孔と軽い正孔のバンド縮退が解けてレーザ利得が増加する事が知られている⁴⁾。

レーザ利得の増加により、発振閾値電流は低減し、スロープ効率も増大するので高出力動作に有利となる。

更に、GaInPAs材料では圧縮歪み量子井戸を用いると、偏光制御の点でも好ましい。VCSELでは共振器の形状が基板面内の直交する2方向で対称な場合が多く、偏光制御が難しい問題がある。偏光方向を制御するには光学損失や、レーザ利得に異方性を持たせて特定の偏光成分を優先的に発振させる様にする方法が用いられる。共振器形状を十分に非対称とすると損失に異方性を設ける事ができるが、放射角等やシングルモード出力等の他の特性に対して大きな影響を及ぼすので現実的ではない。従ってレーザ利得に異方性を持たせる事が有効であり、傾斜基板の利用や、活性層への歪み応力の導入によりレーザ利得に異方性が生じる事が知られている^{5,6)}。しかし、780nm帯で一般的に用いられているAlGaAs活性層は、歪み応力の導入が難しいので、AlAs層の酸化応力を利用した偏光制御が報告されている⁷⁾。我々は15°傾斜した基板とGaInPAs圧縮歪み量子井戸構造、及び異方性形状を有した高次モードフィルタを用い、更に活性層の歪み量を最適化する事によって、20dB以上の高い偏光抑圧比でアレイ内の40チャンネルの偏光方向を[0-11]方向に制御した。以上が780nm帯における活性層材料として、GaInPAs材料を採用した理由である。

4. 放熱特性の改善

次に、放熱構造について説明する。半導体レーザの出力は熱により制限されている。したがって、高出力化の為に素子の放熱特性を改善し、活性層の温度上昇を低減する必要がある。この為に素子構造の改良や、ジャンクションダウン等の実装形態の工夫による放熱改善等が必要である^{8, 9)}。特にVCSELでは、基板側多層膜反射鏡として40ペア以上のDBRが積層されており、この厚さは端面発光型半導体レーザのクラッド層に比べておよそ5倍程度厚い。また、780nm帯では基板による光吸収を避ける為に上面出射とする事が好ましいが、40チャンネルが高密度に集積されている事から実装上検討できる自由度が少ない。従って、多層膜反射鏡の放熱を改善し、基板への放熱を向上させる事が重要である。この為に基板側多層膜反射鏡の材料と構成について検討を行った。先ず、材料について説明する。Fig.3は多層膜反射鏡の材料であるAlGaAsの熱伝導率と屈折率を示したものである。

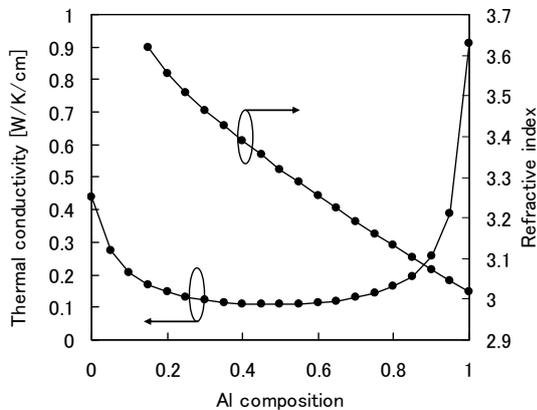


Fig.3 Thermal conductivity and refractive index of AlGaAs.

AlGaAsは3元混晶であるが、一般に3元混晶は中間組成のもの程熱伝導率が低く、両端の組成である2元の化合物 (AlAs, GaAs) で高くなる。特にAlAsが最も熱伝導率が高い事が分かる。また、屈折率はAlAsが最も小さく、Al組成の減少に伴って増加する。バンドギャップエネルギーはAlAsが最も大きく、Al組成の減

少に伴い減少する。多層膜反射鏡の材料としては、反射特性的には発振光を吸収しない組成で、2種の材料の屈折率差が大きい程好ましい。780nmの光に対して十分吸収が少ない組成として $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ を高屈折率層として用いた。低屈折率材料は、屈折率が最も小さく、更に熱伝導率の最も大きなAlAsが望ましい。しかし酸化狭窄型VCSELではメサ形成時に基板側多層膜反射鏡までエッチングが達すると、酸化工程でAlAsが酸化されてしまうので、AlAsを低屈折率材料に用いる為にはエッチング深さをウエハ面内に渡って精密に制御する必要がある。しかしながら、エッチング深さを精密に制御する事は難しいので、通常は低屈折率材料に酸化速度の遅い $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ を用いる様にしている。この為、従来の多層膜反射鏡は熱抵抗が大きくなっていた。これに対し、我々の開発したVCSELでは、共振器をAlGaInP材料で構成した事によりエッチング深さの面内制御性が大幅に向上し、AlAsを低屈折率層として用いる事が可能になっている。AlGaInP材料に含まれるInは、エッチングのプロセスガス中の塩素と結合し、表面にInの塩化物を形成する。Inの塩化物は蒸気圧が低く、表面から脱離しにくい為AlGaAs材料等と比べてエッチング速度が著しく低下する。

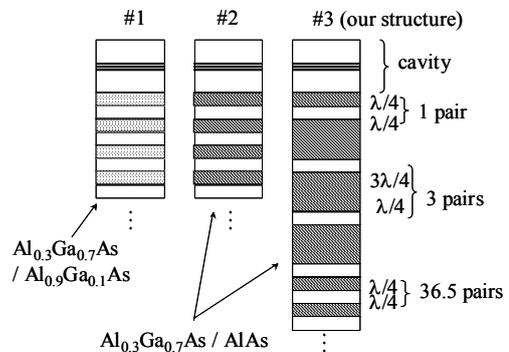


Fig.4 Schematics of heat radiation structure.

従って共振器部分がエッチング深さの差を吸収する吸収層として機能し、ウエハ面内においてエッチング底部がAlGaInP共振器内に留まる様に制御する事が可能であり、従来に比べて熱抵抗を小さくする事ができる。これに加えて、我々は組成以外に構造についても検討を行い、Fig.4の#3に示す様に、共振器の近傍にAlAs低屈折率層の厚さを厚くした放熱構造を設け、更なる熱

抵抗の低減を実現した。この構造では、共振器付近における3ペアのAlAs低屈折率層の厚さを $3\lambda/4$ 厚さとしており、熱抵抗の低いAlAs層を厚くする事で横方向への放熱を促進させ、従来よりも広い面積を通して基板側に放熱させる事によって熱抵抗を低減させている。#3の放熱構造の効果を確認するため、Fig.4の#1、#2に示す多層膜反射鏡を有した素子を作製し、特性を比較した。#1の構造は全ての層を $\lambda/4$ 厚さの $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ とし¹⁾、#2は全ての層を $\lambda/4$ 厚さのAlAs/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ とした¹⁰⁾。#1~3の多層膜反射鏡を有した素子(OA面積 $20\mu\text{m}^2$)の熱抵抗を発振波長の変化から見積もったところ¹¹⁾、それぞれ3872、3102、2867 [K/W]となり、#3は#1に比べて約26%、#2に比べて8%熱抵抗が低減していることが確認できた。

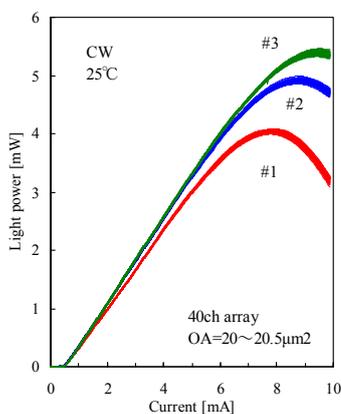


Fig.5 Comparison of I-L characteristics.

Fig.5に3種の40チャンネルアレイのI-L特性を示す。熱抵抗が小さな構造ほど、活性層の温度上昇が低減する事によって飽和出力が増大している。また、#3の放熱構造を用いた素子では、#1の構造を用いた素子に対してシングルモード出力(単一基本横モード出力)が1mW以上向上した。Fig.6は自己発熱によるパルス駆動時の出力変化(ドロープ特性)を示したもので、CW駆動で1.5mWとなる電流値により定電流パルス動作させた場合の光出力波形を示している。書き込み光源では光出力の変化によって画像にムラを生じるため、ドロープ特性は重要な特性である。#3の構造では#1に比べて、点灯直後と点灯後 $10\mu\text{s}$ 後の光量比 $\Delta V=(V_1-V_2)/V_2$ が約9割低減され、光量変動が大幅に改善された。

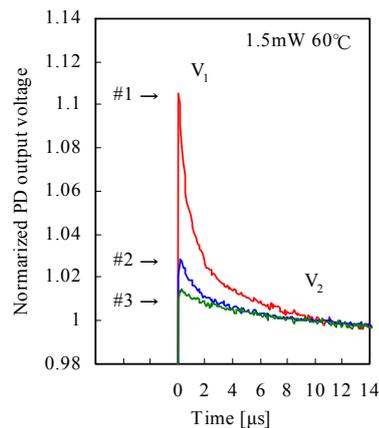


Fig.6 Comparison of droop characteristics.

更に、アレイの熱干渉を調べる為に、中心の1チャンネルをFig.6と同じ条件で先行して点灯し、 $5\mu\text{s}$ 後に残りの39チャンネルを同様に点灯させた時の先行チャンネルの光量変化(低下)の割合を評価した結果、#3の構造を有した素子は、#1の構造を有する素子に対して光量変動が約50%程度小さく、放熱特性を改善した事により、チャンネル間の熱干渉も大幅に低減された。

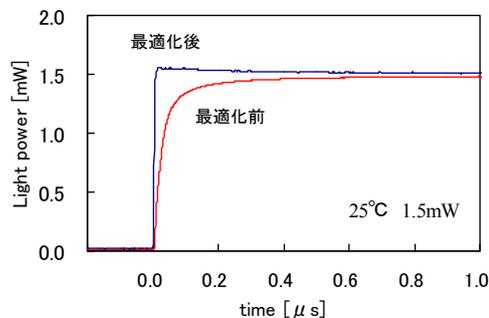


Fig.7 Improved wave pattern.

この様に、アレイの熱干渉が低減された結果、素子寿命も大幅に改善されている。Fig.6に示した様に、ドロープ特性は光パルスの立ち上がりから数 μ 秒のスケールで発生し、発熱によって光量が低下する現象であるが、Fig.7に示す様に、これよりも短い時間スケールでは逆に光量が緩やかに増加し、パルスの立ち上がりが鈍る課題があった。我々は、素子の温度特性や、横方向光閉じ込めの最適化によって、Fig.7に示す様に

最適化前（赤色）に比べ急峻な応答波形（青色）を実現した。以上によって、濃度ムラの少ない高品質な画像を得る事が可能になった。

5. 異方性高次モードフィルター構造

一般に光学素子に偏光依存性がある場合には、偏光方向の違いによってビーム強度が変化する。従って、どのような光学系に対しても、常に濃度ムラの無い高品質な画像を得る為には、アレイ内の偏光方向が特定の方向に安定に制御されている必要がある。また、高速書き込みの為には高いレーザ出力が必要とされるが、ビーム品質的にはシングルモード発振である事が望ましい。我々は、素子の出射表面に高次モードフィルター構造を設ける事によりこれらを同時に達成した。

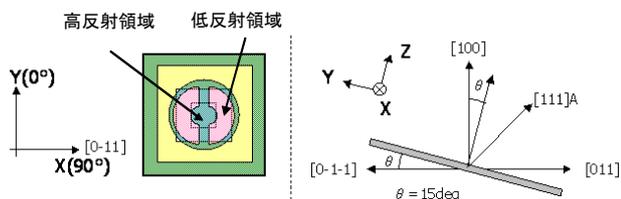


Fig.8 Top view of higher mode filter and definition of polarization angle.

Fig.8は、この高次モードフィルターの模式図である。フィルターは $\lambda/4$ 厚さのSiN膜により構成されており、素子中央部を除いた周辺領域に設けている。また、フィルターの形状は、偏光の安定性を向上させる為に[011]方向で2つに分断された異方性形状とした。フィルターが設けられた部分では多層膜反射鏡は $\lambda/4$ 厚さの低屈折率で終端されて反射率が低下する。基本モードと高次モードは、それぞれ素子の中央部と、その周辺部にモード分布を有しているため、モードフィルターは高次モードに対して多層膜反射鏡の反射率を選択的に低下させて発振を抑制する。

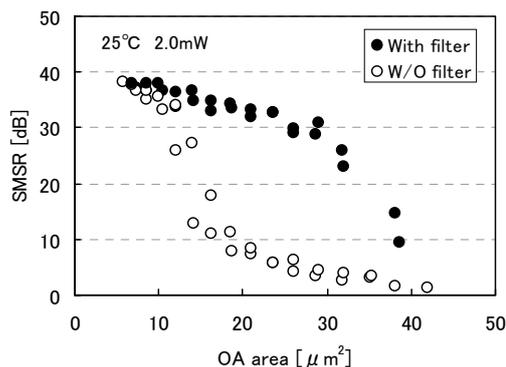


Fig.9 Comparison of single mode power as a function of OA area.

この結果、基本横モードのみが発振し、シングルモード出力が増加する。Fig.9は、Fig.8に示した高次モードフィルターによるシングルモード出力の向上効果を示したものである。高次モードフィルターを設ける事により、2mWの出力において、 $30\mu\text{m}^2$ までの広い範囲のOA面積に対して30dB以上の高いSMSR (side mode suppression ratio) を達成しており、生産上有利である。

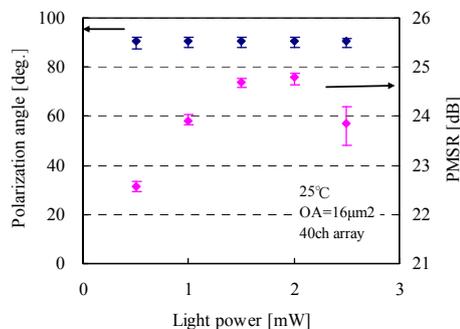


Fig.10 PMSR and polarization angle as a function of light power.

次に偏光特性について説明する。Fig.10は、OA面積が $16\mu\text{m}^2$ の40チャンネルアレイの偏光方向と、偏光抑圧比を示したものである。傾斜基板と圧縮歪み量子井戸構造、異方性形状フィルターを組み合わせる事により、0.5~2.5mWの出力範囲で、[0-11]方向に標準偏差 $\sigma=1.1^\circ$ 以内で偏光方向が揃っている。また、

0.5~2.5mWの出力範囲において22dB以上の偏光抑圧比 (PMSR : polarization mode suppression ratio) が得られている。比較の為に円環状の高次モードフィルターを作製して偏光特性を調べたところ、円環状のフィルター形状では偏光抑圧比が低下し、直交した方向に偏光角がスイッチングする場合があった。この事から、今回採用した異方性高次モードフィルターにより偏光の安定性が大幅に向上し、高いシングルモード出力と偏光安定性の両方が実現できている。

6. まとめ

GaInPAs活性層と放熱構造の採用により、高出力動作が可能で、ドループ特性に優れ、チャンネル間の熱干渉が少なく、更に長期信頼性に優れた高密度VCSELアレイを実現した。また、温度特性と横方向光閉じ込めの最適化により、急峻なパルスの立ち上がり特性を実現した。更に、GaInPAs圧縮歪み活性層、傾斜基板、異方性高次モードフィルターにより安定で均一な偏光特性と、高いシングルモード出力を同時に達成した。以上により、高密度で高速書き込みが可能な40チャンネルVCSELアレイを実現した。

参考文献

- 1) N.Mukoyama et al.: "VCSEL array-based light exposure system for laser printing," Proc. of SPIE, Vol.6908, 69080H, (2008).
- 2) R.P.Schneider, Jr., and M.Hagerott-Crawford: "GaInAsP/AlGaInP-based near-IR (780nm) vertical-cavity surface-emitting lasers," Electron. Lett., Vol.31, (1995), pp.554-556.
- 3) N.Tansu, D.Zhou, and L.J.Mawst: "Low-temperature sensitive, compressively strained InGaAsP active ($\lambda = 0.78-0.85 \mu\text{m}$) region diode lasers," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.12, (2000), pp.603-605.
- 4) P.J.A.Thijs: "Progress in quantum well lasers: Application of strain," 13th IEEE Semiconductor Laser Conf. A-1, Takamatsu/Japan, Sept., (1992).
- 5) R.H.Henderson, and E.Towe: "Strain and crystallographic orientation effects on interband optical matrix elements and band gaps of [11]-oriented III-V epilayers," J. Appl. Phys., Vol.78, (1995), pp.2447-2455.
- 6) N.Nishiyama et al.: "Lasing characteristics of InGaAs-GaAs polarization controlled vertical-cavity surface-emitting laser grown on GaAs (311)B substrate," IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., Vol.5, (1999), pp.530-536.
- 7) 前田 他: "レーザプリンタ用 偏光制御型シングルモード VCSEL アレイの開発" 第 55 回春季応用物理学関係連合講演会, 30a-ZQ-1, (2008).
- 8) H.Roscher, and R.Michalzik: "Low thermal resistance flip-chip bonding," LEOS, The 16th Annual Meeting of the IEEE, (2003).
- 9) A.N.Al-Omari et al.: "Low thermal resistance high-speed top-emitting 980-nm VCSELs," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.18, (2006), pp.1225-1227.
- 10) K.M.Lascola, W.Yuen, and C.J.Chang-Hasnain, "Structural dependence of the thermal resistance of vertical cavity surface emitting lasers," IEEE/LEOS Summer Topical Meeting, (1997), pp.79-80.
- 11) R.Pu et al.: "Thermal resistance of VCSEL's bonded to integrated circuits," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.11, (1999), pp.1554-1556.