

# Low Threshold GaInAsP Lasers with Semiconductor/Air Distributed Bragg Reflector Fabricated by Inductively Coupled Plasma Etching

Maiko ARIGA, Yushi SEKIDO, Atsushi SAKAI, Toshihiko BABA, Akihiro  
MATSUTANI<sup>1</sup>,  
Fumio KOYAMA<sup>1</sup> and Kenichi IGA<sup>1</sup>

*Yokohama National University, Division of Electrical and Computer Engineering, 79-5  
Tokiwadai, Hodogayaku, Yokohama, 240-8501, Japan* <sup>1</sup> *Tokyo Institute of Technology,  
Precision and Intelligence Laboratory, 4259 Nagatsuda,  
Midoriku, Yokohama, 226-8503, Japan*

Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 39 (2000) pp. 3406–3409 Part 1, No. 6A, June 2000  
@ 2000 The Japan Society of Applied Physics  
(Received October 22, 1999; accepted for publication March 14, 2000)

## Abstrak

*Short cavity Laser GaInAsP/InP difabriksikan dengan semiconductor/air distributed Bragg reflectors (DBRs) by inductively coupled plasma di-etching menggunakan gas Cl<sub>2</sub> murni. Nearly vertical sidewalls dengan kekasaran rendah ~10 nm didapatkan, dipisahkan oleh ruang udara sebesar ¾ panjang gelombang. Arus ambang terkecil normalisasi terhadap lebar strip sebesar 3,2 mA/μ. Dari nilai ini, telah dievaluasi nilai reflektifitas DBR sebesar 85 %, yang cocok dengan nilai teoritis didapatkan dari finite-difference time domain (FDTD). Dibandingkan 2 tipe dari devais dengan bentuk DBR yang berbeda, dan diamati bahwa reflektifitas DBR lebih dipengaruhi oleh tilt dari DBR sidewalls daripada kekasaran sidewall. Hasil ini sesuai dengan teori FDTD*

*Kata kunci: Semiconductor laser, GaInAsP/InP, distributed Bragg reflector laser, inductively coupled plasma etching, finite difference time domain simulation.*

## I. Pendahuluan

*Laser diodes* untuk akses jaringan dan *local area data links* membutuhkan proses fabrikasi yang sederhana untuk produksi massal yang mudah dan *performance* yang tinggi, dan mudah juga diintegrasikan dengan elemen lain, sebagai contoh pemandu gelombang, detektor dan filter. Sebuah *short cavity laser* dengan *semiconductor/air distributed Bragg reflector (DBR)* cocok untuk tujuan ini. Devais tersebut terdiri dari sebuah *stripe cavity* dengan *GaInAsP strained quantum well active layer* dan *semiconductor/air DBRs*, dimana dinding vertikal semikonduktor dipisahkan oleh ruang udara. Struktur seperti itu dapat dibentuk secara monolitik oleh *anisotropic etching*. Perbedaan indeks bias yang tinggi membuat reflektivitas yang tinggi bahkan dengan jumlah periode yang kecil, sehingga sebuah *short cavity* mungkin dibuat, dimana memberikan arus ambang yang rendah dan cocok untuk modulasi zero-bias dan operasi mode longitudinal tunggal. Bagaimanapun juga, fabrikasi dari DBR seperti itu, dimana dibuat dari material dasar InP adalah suatu tantangan. Sejauh ini, proses *dry* dan *wet etching* telah digunakan. Menggunakan  $\text{Cl}_2$  *ion beam etching (RIBE)*, *vertical sidewalls* mudah didapatkan, tetapi kasar dan tidak seragam. *Wet etching* menghasilkan *sidewall* yang halus, tetapi tidak simetris/miring. Sebagai tambahan mekanisme degradasi dari reлектifitas tidak jelas. Pada studi ini, digunakan *inductively coupled plasma (ICP) etching* untuk mengatasi masalah ini. Menggunakan metode ini, *etching* yang baik dan halus telah didemonstrasikan pada sistem material ini. DBR difabrikasikan dan dievaluasi reflektivitasnya didasarkan pada karakteristik lasing. Dibandingkan evaluasi reflektivitas dengan reflektivitas perhitungan didapatkan menggunakan metode dua dimensi *finite difference time domain (FDTD)* dan menginvestigasi faktor dominan yang dibutuhkan untuk DBR dengan reflektivitas tinggi.

## II. Fabrikasi DBR

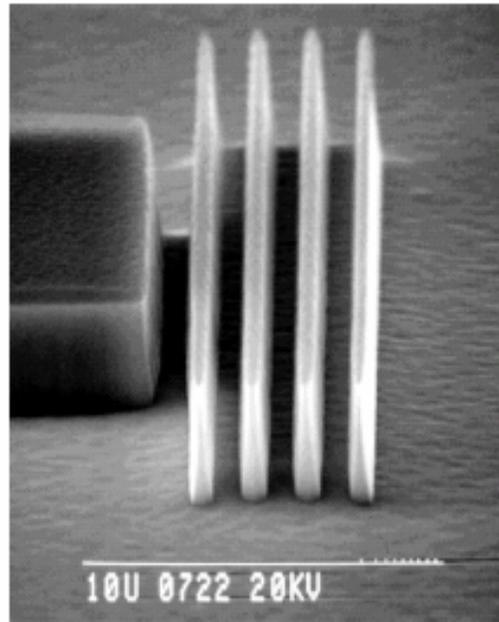
Disiapkan sebuah *epitaxial wafer* ditumbuhkan pada substrat InP oleh *metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE)*. *Epilayers* terdiri dari n-InP *cladding layer*, GaInAsP *active layer* dengan ketebalan 0,25  $\mu\text{m}$ , 1,7  $\mu\text{m}$  p-InP *cladding* dan 0,3  $\mu\text{m}$  p-GaInAs *contact layer* dari dasar. Aktif layer terdiri dari 8 *compressively-strained quantum-wells* dengan ketebalan 4 nm masing masing dengan 10 nm *thick strain-compensated barriers* dan gradien indeks memisahkan *confinement heterostructure layers*. Puncak panjang gelombang dari emisi

spontan adalah  $1,53 \mu\text{m}$ , dan panjang gelombang lasing dari *broad area lasers* biasanya  $1,55 \mu\text{m}$ . Desain dan proses fabrikasi serupa dengan yang dilaporkan sebelumnya kecuali untuk metode *etching*. Lebar dari strip  $w$  adalah  $20 \mu\text{m}$ . Panjang rongga  $L$ , adalah panjang dari stripe, bervariasi dari  $150$  sampai  $250 \mu\text{m}$  pada sample. DBR diletakkan pada salah satu ujung dari strip sebagai *backside mirror* dan satu untuk ujung yang lain, sebuah *etched facet* sederhana digunakan sebagai *front mirror*. Lebar dari DBR didesain 2 kali lebar dari strip, yaitu  $40 \mu\text{m}$ , untuk menghilangkan pengaruh dari kerapuhan dari *side edges of DBR*. Ketebalan dari dinding semikonduktor dan ruang udara adalah  $\frac{3}{4}$  dari panjang gelombang lasing  $\lambda$  yaitu  $0,35 \mu\text{m}$  dan  $1,15 \mu\text{m}$ , untuk  $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$ . Jumlah *semiconductor/air pairs*  $N$  adalah tetap yaitu 4. Menurut perhitungan FDTD dari DBR reflektifitas,  $N = 3$  cukup untuk mendapatkan reflektifitas maksimum dibatasi oleh loss difraksi pada ruang udara. Bagaimanapun juga,  $N$  yang besar efektif untuk mengurangi ketidak-seragaman dari ketebalan dinding semikonduktor.

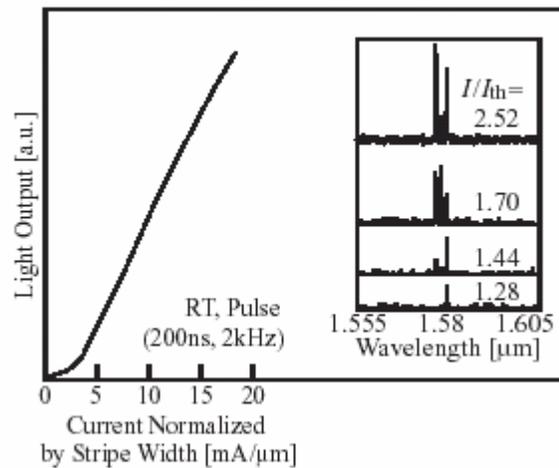
Selama proses fabrikasi, elektroda AuZn dan AuGe dibentuk pada *epitaxial* dan *back-surfaces* dari *wafer*. Sesudah membentuk elektroda AuZn ke dalam bentuk persegi-panjang, pola dari DBR digambarkan pada sisi ini oleh *electron beam lithography* menggunakan *negative resist* SAL601-SR7 (Shipley Co.,Inc), dan *epilayers* di-*etching* menggunakan gas  $\text{Cl}_2$  murni. Kecepatan aliran gas adalah  $10,0 \text{ sccm}$  dan tekanan gas adalah  $0,5 \text{ Pa}$ . Daya dari ICP dan daya bias adalah  $300 \text{ W}$  dan  $200 \text{ W}$ . Dibawah kondisi ini, rata-rata *etch* dari InP mendekati  $1,0 \mu\text{m}/\text{min}$ . Gambar (1) menunjukkan scanning electron micrograph (SEM) dari sampel. Sudut *sidewall* lebih dari  $89^\circ$  dan perkiraan kekasaran diperkirakan secara kasar kurang dari  $10 \text{ nm}$ .

### III. Karakteristik Lasing

Untuk tujuan pengukuran, wafer dipotong ke dalam potongan-potongan masing masing memiliki satu chip devais. Masing masing potongan ditempatkan pada *n-side down* pada sebuah *submount* tanpa ikatan logam. Gambar (2) menunjukkan karakteristik umum dari sebuah sampel dengan panjang rongga  $L = 250 \mu\text{m}$  pada suhu ruang pada kondisi pulsa (lebar pulsa  $200 \text{ ns}$  dan frekuensi pengulangan  $2 \text{ KHz}$ ).



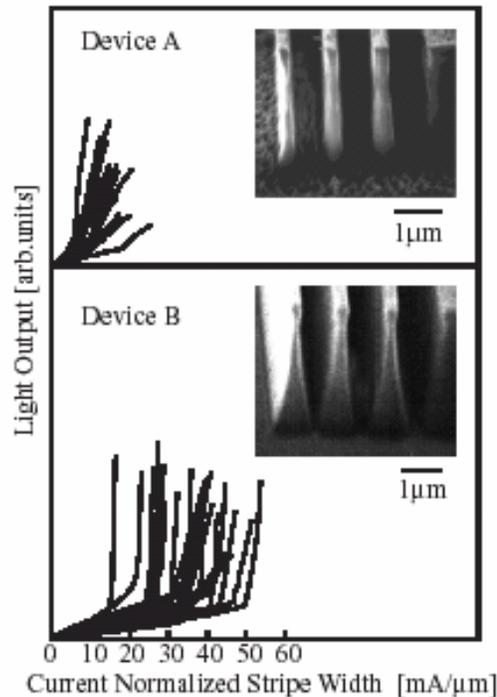
Gambar (1). Side view dari DBR yang difabrikasi.



Gambar (2). Karakteristik output cahaya terhadap normalisasi arus dan spektrum lasing untuk devais dengan panjang rongga 250  $\mu\text{m}$ .

Pada gambar (2), arus dinormalisasikan terhadap lebar strip  $w$ . Arus ambang normalisasi terendah  $I_{th}/w$  adalah 3,2  $\text{mA}/\mu\text{m}$ . Spektrum menunjukkan karakteristik lasing multimode . Hal ini disebabkan *stopband* yang lebar dari tipe DBR. Operasi mode tunggal dapat diperoleh dengan mengurangi panjang rongga kurang dari 50  $\mu\text{m}$ .

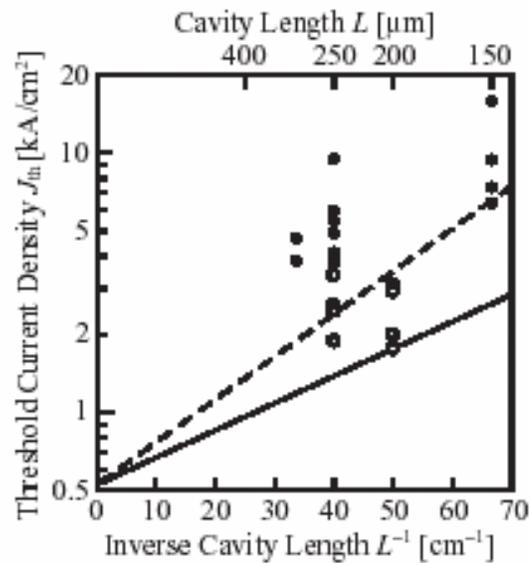
Diamati ada hubungan jelas antara bentuk DBR dan *etched facet*, dan karakteristik lasing. Menggunakan kondisi *chamber* yang berbeda, didapatkan dua tipe devais dengan bentuk DBR yang berbeda. Karakteristik lasing dari devais ini dan *SEM photographs* diringkaskan pada gambar (3).



Gambar (3). Side views dan karakteristik dari dua tipe devais A dan B.

Devais A memiliki *semiconductor sidewalls* yang hampir vertikal dengan kekasaran yang relatif tinggi lebih dari 20 nm. Devais B memiliki *tapered sidewalls* dengan kekasaran yang rendah ~10nm. Bentuk dan kekasaran dari *etched facet* pada devais hampir sama untuk kedua tipe DBR tersebut. Jelas bahwa arus ambang jauh lebih rendah untuk devais A daripada devais B. Pada gambar (4), diplot hasil pengukuran kerapatan arus ambang  $J_{th}$  dengan invers panjang rongga ( $L^{-1}$ ). *Garis lurus* mengindikasikan nilai teoritis didapatkan dengan asumsi penguatan logaritmik  $g = g_0 \ln(J/J_0)$  untuk *strained quantum-wells* dan kerapatan arus untuk kondisi transparan  $J_0 = 512 \text{ A/cm}^2$ , koefisien penguatan  $g_0 = 627 \text{ cm}^{-1}$  dan loss internal rongga  $5 \text{ cm}^{-1}$ , dimana telah dievaluasikan untuk *cleaved lasers*. Data eksperimen untuk panjang rongga ditunjukkan memiliki nilai penyimpangan yang besar. Ini disebabkan oleh loss hamburan yang tak teratur pada *stripe mesas*, *etched facet* dan *DBRs*,

dimana kerusakan mekanik disebabkan *cleaving* dari *wafer* dan *mounting* dari masing masing chip devais pada sebuah *submount* dengan *a metal fitting*.



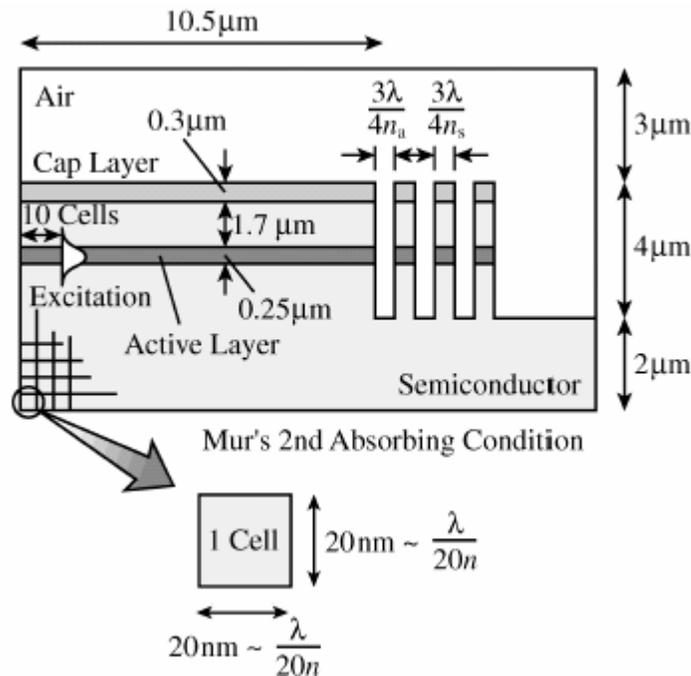
Gambar (4). Karakteristik kerapatan arus ambang terhadap invers panjang rongga ( $L^{-1}$ ). Lingkaran terbuka dan tertutup menggambarkan devais A dan B. *Solid lines* mengindikasikan hasil teoritis dengan mengasumsikan reflektifitas DBR,  $R_{\text{DBR}} = 85\%$ ,  $R_f = 28\%$  *Dashed lines* mengindikasikan hasil ketika diasumsikan  $R_{\text{DBR}} = 50\%$  dan  $R_f = 10\%$ .

Nilai reflektivitas dari *etched facet* dan DBR diperkirakan dengan mencocokkan kurva teoritis dengan kerapatan arus ambang minimum dari masing masing tipe devais. Difabrikasikan strip laser sederhana tanpa DBR tapi dengan kumpulan *etched facet*. Pertama dievaluasi reflektivitas dari *etched facet* dengan mengukur  $J_{\text{th}}$  laser, nilainya adalah 28 % dan 10 % untuk devais A dan B. Didasarkan pada hasil ini, reflektivitas DBR dari devais A dengan menggunakan nilai terendah  $J_{\text{th}}$  adalah 85 %. Sedangkan reflektivitas untuk devais B adalah 50 %. Perbedaan reflektifitas antara DBR dan facet mengindikasikan bahwa reflektivitas sangat dipengaruhi oleh *tilt* dari *semiconductor sidewalls* dan tidak terlalu sensitif terhadap *sidewall roughness*.

#### IV . *Consideration*

Dibandingkan reflektifitas yang didapatkan dengan perhitungan teori menggunakan metode FDTD. Untuk perhitungan, digunakan 20 nm *Yee's square cells*, membagi model struktur laser dipandang dari arah lateral seperti pada gambar (5). Diasumsikan sebuah *infinite*

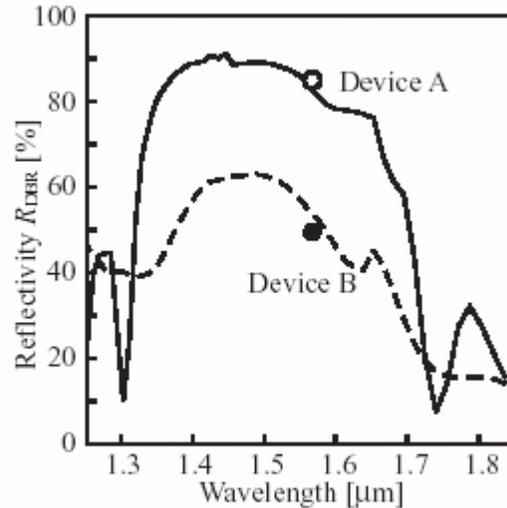
*lateral width* and sebuah *transverse electric field* untuk mode laser. Pulsa gaussian 40 fs full width pada  $1/e^2$  maksimum dengan *guided mode profile* pada laser digunakan sebuah medan pengeksitasi. Reflektivitas DBR dievaluasi dengan menghitung *overlap integral* antara *profile* dari *analytical guided mode* pada *waveguide* dan dari pulsa cahaya yang dipantulkan oleh DBR dan *ter-coupled* lagi pada *waveguide*. Kemudian diinputkan data hasil pengukuran dari bentuk DBR devais A dan B ke komputer.



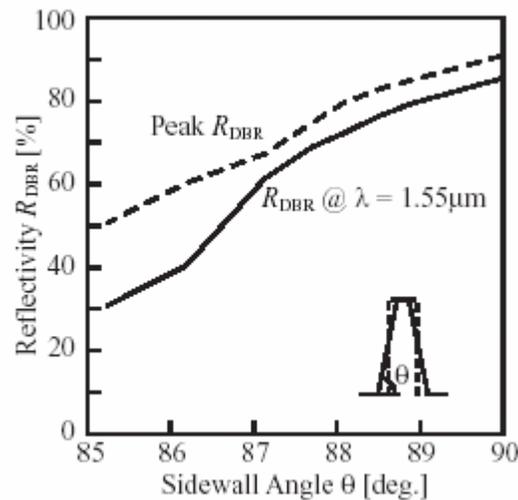
Gambar (5). Model perhitungan FDTD.

Gambar (6) menunjukkan spektrum refleksi dari DBR, dimana didapatkan dari *Fourier transform* dari *time series overlap integral*. Untuk devais ini, *stopband* terletak antara 1,3  $\mu\text{m}$  sampai 1,7  $\mu\text{m}$ . Puncak reflektifitas ada pada panjang gelombang yang lebih pendek dari *stopband center.*, karena panjang gelombang yang lebih panjang mengalami loss difraksi yang lebih besar pada ruang udara. Nilai eksperimen diindikasikan oleh lingkaran terbuka yang hampir sesuai dengan hasil perhitungan.

Seperti didiskusikan pada bagian sebelumnya, *sidewall angle* dari *semiconductor* lebih krusial untuk DBR reflektivitas DBR daripada kekasaran *sidewall*. Dihitung kebergantungan reflektivitas terhadap sudut pada  $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$  dan terhadap panjang gelombang memberikan puncak reflektivitas, seperti pada gambar (7).



Gambar (6). Spektrum reflektivitas dari DBR. *Solid* dan *dashed lines* mengindikasikan nilai teoritis untuk devais A dan B. *Open* dan *closed circles* mengindikasikan nilai eksperimen dari devais tersebut.

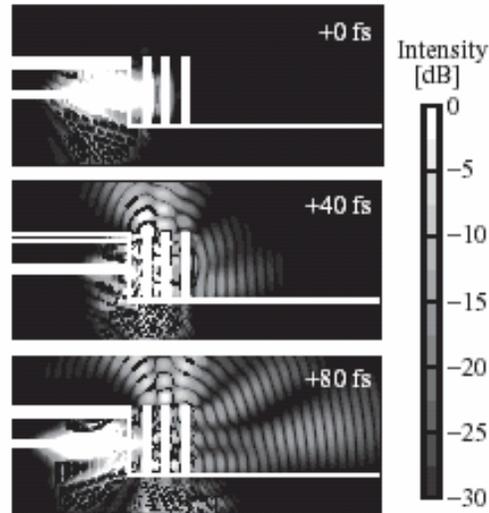


Gambar (7). Reflektivitas dihitung dengan *sidewall angle*.

Reflektivitas dipengaruhi kuat oleh *tilt* dari *sidewall*; pengurangan *tilt* yang hanya  $5^\circ$  mengurangi reflektivitas menjadi  $\sim 30\%$ .

Juga diinvestigasi sifat dari cahaya disekeliling DBR pada devais A dengan metode FDTD. Pulsa cahaya yang dipantulkan oleh DBR diperlihatkan pada gambar (8). Dari gambar tersebut, diperkirakan sejumlah daya cahaya dihamburkan pada masing masing arah oleh DBR. 85 % daya cahaya dipantulkan dan di-*coupled* ke *waveguide* dan 9,2 % dipantulkan

tapi tidak di-*coupled* ke *waveguide*. Hal ini menyebabkan pada efisiensi kuantum eksternal.



Gambar (8). Profile intensitas disekeliling DBR pada devais A.

Sebagai tambahan, 3,5 % didefleksikan ke atas, 2 % didefleksikan ke bawah, dan 0,3 % melalui DBR ke arah kanan. Maka walau kita memasang monitor detector pada sisi kanan dari DBR, tetap akan sangat sulit untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi. Didapatkan bahwa loss difraksi dapat dikurangi secara signifikan dengan menyempitkan ruang udara ke  $\lambda/4$  yaitu  $0,39 \mu\text{m}$ . Tapi, ruang yang sempit ini sulit untuk difabrikasi tanpa *severe optimization* dari kondisi *etching*. Juga ditentukan bahwa, walaupun ruang udara didesain menjadi  $3 \lambda/4$ , loss difraksi pada ruang dapat ditekan dan reflektivitas maksimum dapat ditingkatkan sampai  $> 90\%$  dengan menyisipkan pada ruang dengan beberapa material transparan seperti polimide dengan indeks bias  $\sim 1,6$ . Lasing dengan kinerja yang tinggi telah didemonstrasikan dengan menyisipkan pada ruang dengan *benzocyclobutene (BCB) polymer*.<sup>6)</sup>

## V . Kesimpulan

Difabrikasikan sebuah *high reflectivity semiconductor/air DBR* oleh ICP etching dengan gas  $\text{Cl}_2$  murni. DBR memiliki *sidewalls* yang halus dengan sudut lebih dari  $90^\circ$  terhadap bidang substrat dan kekasaran kurang dari 10 nm. Pada sebuah sistem GaInAsP/Inp strip laser

dengan DBR seperti itu pada salah satu ujungnya, arus normalisasi ambang terhadap lebar strip menjadi rendah yaitu 3,2 mA/ $\mu\text{m}$ . Reflektivitas yang dievaluasi adalah 85 %, dimana cocok dengan nilai teori yang didapatkan dengan metode FDTD. Secara teoritis dan eksperimen dikonfirmasi bahwa *tilt* dari *vertical sidewall* lebih krusial untuk mendapatkan DBR dengan reflektivitas tinggi daripada kekasaran dari *sidewall*.

## VI. Referensi

- 1) T. Baba, M. Hamasaki, N. Watanabe, P. Kaeplung, A. Matsutani, T. Mukaihara, F. Koyama and K. Iga: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) 1390.
- 2) M. Hamasaki, P. Kaewplung, T. Baba, A. Matsutani, F. Koyama and K. Iga: Proc. Optoelectronic and Communication Conf., Makuhari (1996) 18P-31.
- 3) Y. Yuan, T. Brock, P. Bhattacharya, C. Caneau and R. Bhat: IEEE Photon. Technol. Lett. **9** (1997) 881.
- 4) T. Mukaihara, N. Yamanaka, N. Iwai, T. Ishikawa and A. Kasukawa: Electron. Lett. **34** (1998) 882.
- 5) E. Höfling, R. Werner, F. Schäfer, J. P. Reithmaier and A. Forchel: Electron. Lett. **35** (1999) 154.
- 6) M. M. Raj, Y. Saka, J. Wiedmann, H. Yasumoto and S. Arai: Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) L1240.
- 7) A. Matsutani, H. Ohtsuki, F. Koyama and K. Iga: Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) 4260.
- 8) R. Jambunathan and J. Singh: IEEE J. Quantum Electron. **33** (1997) 1180.
- 9) N. Habu, H. Tago, T. Baba, A. Matsutani, F. Koyama and K. Iga: Ext. Abstr. Fall Meet. Japan Society of Applied Physics, 1996, 8p-KH-16 [in Japanese].