

ISLC2006 速報

足立 光一朗、青木 雅博（日立中研）

会議名：IEEE 20th International Semiconductor Laser Conference (ISLC2006)

開催期間：2006年9月17日～21日

開催場所：Hapuna Beach Prince Hotel (Kohala Coast, HW、米国)

*****要 約*****

本会議は半導体レーザ専門の会議であり、2年毎の開催である。通信用レーザでは小型化、低消費電力化がキーワードとなっており、モノリシック集積技術（EA変調器、DBRレーザ、半導体光増幅器、アイソレータ等の集積）と無温調動作を目的とした報告があった。また、波長可変レーザでは新型構造が数多く報告されていた。VCSELにおいては量子ドット、フォトリソニック結晶やナノホールアレイなどナノ技術により確実に性能が進化、85°Cで20Gbps動作が報告された。また、量子カスケードレーザを中心として中赤外からテラヘルツ領域で発振するレーザも注目され進展が見られた。招待講演の一部とランプセッションでは、シリコンフォトリソニックがテーマに取り上げられ、Si-III/V貼り付け技術を中心にして白熱した議論が交わされ、この分野の注目度の高さが伺えた。

◆会議の概要

IEEE 半導体レーザ国際会議 (IEEE International Semiconductor Laser Conference: ISLC) は通信、情報、記録、検出、加工、各種センシング等に用いられる半導体レーザおよびその関連機能デバイス・モジュールに関する唯一の専門国際会議であり偶数年に開催される。開催場所は伝統的に米、欧、日（アジア）の持ち回りである。第20回の今回は、Hawaii Big Island, Kohala Coast Resortにて開催された。Hawaiiでの開催は1994年以来2回目である。ISLCは全てシングルセッションで進行され、参加者全員が議論に集中できるのが特徴であるが、海亀が漂う美しい海岸線を見渡せるテラス近くの会議室で、今回も半導体レーザの進展に関する集中議論が5日間に渡り展開された。

会議日程は初日にチュートリアル講演が行われた後、2日目から招待講演、レギュラーペーパー、ポストデッドラインペーパーの発表が行われた。会議3日目の夜に行われたランプセッションでは“Light emission from silicon: concepts and prospects”と題し、Si光機能デバイスに関するホットなテーマに関し予定を超え夜10時過ぎまで白熱した議論がなされていた。また、レセプション、バンケットがそれぞれ開催され、技術交流と人脈を広げるよい機会が提供されている。

会議データでは、ISLC2006の参加者数は134名（登録ベース）であった。地域別では、北米（50名）、アジア（46名）、欧州（32名）、他となっている。ハワイ開催を考えれば例年通りの内訳となっているが、中国からの参加者がいなかったことが残念であった。プログラムはショートコース3件、招待講演3件、口頭発表58件、ポスター発表24件、ポストデッドライン3件で構成された。テーマ別での内訳では、面発光レーザ（VCSEL）と量子ドットレーザが共に16件と一番多く、通信用エッジエミッター（14件）、量子カスケードレーザと中赤外レーザ（10件）、GaInNAsおよび関連技術（9件）と続く。分野別のセッションは

下記の通りである。以下主だった発表について報告する。

◆詳細内容

0. Invited Review Session

会議の冒頭で以下の3件の招待講演があった。

MA1: Uncooled Lasers for Metropolitan Networks, K. Uomi, Opnext, Japan.

MA2: Recent Progress in Long Wavelength Quantum Cascade Lasers, J. Faist,
University of Neuchatel, Switzerland.

MA3: A Ring Cavity Raman Silicon Laser, M. Paniccia and H. Rong, Intel Corporation,
Santa Clara, USA.

日本オプネクストの魚見氏は、現在進展が著しいメトロネットワークに用いられる小型・省電力光モジュールに搭載される無温度調整で動作する高速半導体レーザに関し、過去の先駆的なレーザダイナミクスの研究から現在の新材料研究、デバイス応用研究までを幅広くレビューした。続いて Neuchatel 大の Faist が、量子カスケードレーザの進展に関し報告した。中赤外域での室温 CW 発振や、THz 帯動作など最近の進展をわかりやすく報告した。最後に、Intel の Paniccia が Raman Silicon Laser と関連技術に関して報告した。

1. Telecom lasers

TuA1 (UCSB) では Sampled grating(SG)-DBR-レーザ、QW-EA 変調器、SOA、Uni-traveling carrier (UTC) PD をモノリシック集積した素子寸法 $0.5\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ の $1.55\ \mu\text{m}$ 帯光トランシーバチップにて 40Gbps 動作をデモンストレーションした。SG-DBR レーザでは波長可変範囲 30nm を実現した。EA 変調器の-3dB 帯域は素子長 $125\ \mu\text{m}$ で 39GHz が得られている。40Gbps の送信実験では駆動電圧 2.5Vp-p にて消光比 10-12dB の良好なアイ開口を得られ、また、40Gbps 受信では SOA/UTC PD 長の異なる 2 仕様の素子にてそれぞれ -16.3dBm および -20.3dBm の受信感度にてエラーフリー動作を実現している。

また、 $1.55\ \mu\text{m}$ 波長帯レーザの高温動作特性改善に関する報告があった。TuA5 (富士通) では $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の AlGaInAs-MQW 活性層を有する Fe ドープ InP 埋め込み $\lambda/4$ シフト-BH-DFB レーザについて報告された。共振器長 $500\ \mu\text{m}$ の素子にて、 100°C で 10mW 以上の光出力が得られており、 $20\text{-}85^\circ\text{C}$ の温度範囲で SMSR は 40dB 以上 @ P=5mW、緩和振動周波数は 25°C で 14.1GHz、 85°C 以上 8.8GHz と良好な高温特性を示し同構造のレーザが低消費電力光源として有望であることをアピールした。

この他、InP 上の $1.55\ \mu\text{m}$ 帯 DFB レーザにモノリシック集積した導波路型アイソレータの初の実動作 (TuA6、東大)、40Gbps で動作する光変調器集積化光源の特性改善 (TuA3、NTT)、80km 長距離伝送用光変調器集積レーザの 50°C 動作 (P23、日本オプネクスト、日立) など、通信用半導体レーザに関する着実な技術進展が報告された。

2. Tunable lasers

TuB1 (NEC) は液晶ミラーを用いた外部共振器型波長可変レーザにおいて利得部と可変光減衰器 (VOA) をモノリシック集積した。その結果、光出力は 100mW 以上 ($I_{\text{gain}}=55\text{mA}$) を達成し、波長可変幅は C-band

をフルカバー、SMSR は 40dB 以上を実現した。利得部と VOA の間の空隙を高屈折率ポリイミド膜で埋めることで回折損を抑え光結合効率の低下を防止したことがポイントである。TuB2 (NTT) は 2 つのリング共振器を組み合わせた波長可変レーザを作製。FSR (free spectral range) をそれぞれ 600GHz、700GHz とすることで波長可変幅 30nm(1540-1570nm)を実現した。また、ピッチ間隔の異なる 2 種類のブラッグ反射器を隣接配置した新型の DBR ベースレーザが (TuB3、Alcatel) 報告された。波長可変原理としては電圧印加により機能する DBR を選択し、30nm の可変幅を実現した。また、Alcatel は、2 次元フォトニッククリスタルミラーを適用した DBR 型波長可変レーザも提案し、単一ストライプレーザにて 18nm の波長可変幅を確認した。TuB5 (富士通) からは gain 領域と tuning 領域を交互に集積した DFB 構造(共振器長 : 700 μ m)の素子にて駆動電圧 0-2V で 5 nm のモードホップフリー波長変化を実現。これを 8 チャンネルアレイ化することで c-band 帯をカバーする波長変化幅 39.5nm でモードホップフリーの光源を作製した。また、挿入損失の波長依存性を低減する新型 Funnel 光合波器を用いた波長選択型光源 (TuB4, NTT) が報告され、実用進展に重要な役割を果たしている印象を受けた。

3. High power lasers

不純物を用いないインターミキシングプロセスを端面窓構造に適用した 915nm 帯 25W レーザ (TuC1、古河電工) やディスプレイ応用を狙った 650nm 帯の 3W 級の赤色レーザ (TuC3、Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik, ドイツ) 等の進展が報告された。また、マスタレーザと光増幅器の 2 チップをハイブリッド実装により一体化した MOPA 構成にて、パルス幅 98psec、ピークパワー130W が達成された (P3、University of Central Florida、米国)。さらに、4 インチの GaAs ウェハラインを適用した 300mW 級の単一横モードの DVD 高速書き込み用レーザ (P7、Eudyna Devices) が報告された。

4. QCL, MIR レーザ

狭バンドギャップ材料を用いた 2~3 μ m 帯の量子井戸レーザおよび超格子のサブバンド間遷移を用いて中赤外からテラヘルツ領域で動作させる量子カスケードレーザについても多くの進展が報告された。

WA1 (State University of New York、米国) から 2.8 μ m 帯で発振する In(Al)GaAsSb/GaSb 系レーザが報告された。InGaAsSb 量子井戸の圧縮歪みを増大させることでレーザ特性が改善することを報告した。圧縮歪みによって価電子帯バンド構造が変化し、ヘビーホール閉じ込めが改善され、低しきい値化が可能であることを理論と実験の両面から実証した。歪み量 17%の素子にて従来の約 50%への低しきい値化を実現し、室温、パルス条件で 200mW の出力が 2.8 μ m 帯で得られるようになっていた。また、従来材料である InP 系の InGaAs 歪量子井戸を用いた 2.1 μ m 帯の DFB レーザが報告された (ThC2、NTT)。Sb を MOVPE でのサーファクタントとして利用し、1.9%もの圧縮歪を有する InGaAs/InGaAs 量子井戸の結晶成長に成功。良好な発振特性を実現した。

一方、WA2 (Technische Universitaet Muenchen、ドイツ) ではインジェクターミニバンドを取り除いた構造の量子カスケードレーザについて報告があった。ミニバンドを無くすことで LO フォノンを介して電子が効率よく下位準位へ遷移されやすくなる。その結果低しきい電流密度化を実現(1.65kA/cm² : 300K)している。室温では 6.8 μ m 帯動作、420K までの発振を確認、素晴らしい特性改善である。また、WA5 (Würzburg 大、ドイツ) では量子カスケードレーザ素子の前後端面近傍にピラー構造の 2 次元フォトニッククリスタルを配置し高反射ミラーとして用いて、しきい値を従来より 30%低減、併せて温度特性も改善した。

5. VCSEL および 6. Surface Emitting lasers

VCSEL に関する報告では光出射面にアレイ状の周期構造を集積あるいは、フォトニッククリスタルをハイブリッドに配置することで出射光の偏光を制御、あるいは高反射率を得るためのミラーとして利用する等の技術が多数報告されたことが特徴的である。WB2 (松下) では、縦横方向に間隔が異なる微小丸穴を配置したナノアパーチャアレイ構造を銀フィルムから作製し、これを発振波長 850nm 帯の VCSEL に適用した。光出射面上にナノアパーチャアレイフィルム集積し、表面プラズモン共鳴を利用することで発振波長 850nm 帯の VCSEL にて OPSR(Orthogonal Polarization Suppression ratio)27dB を得た。さらに、アレイの向きを変えることにより任意の偏光を得られることを実証、比較的容易な手法で偏波面を人為的に制御する技術を確認した。また、WB3 (東工大) では SiO₂ と Nb₂O₅ を積層したピッチ間隔 620nm の一次元スリット状のフォトニッククリスタルをハイブリッド集積した 1.2 μm 帯 VCSEL を作製し、OPSR18dB を得ている。WB4 (UCB、米国) では、VCSEL の上部 DBR ミラーに替わり、1次元スリット状の AlGaAs 1層から成る高反射率ミラー構造(ハイコントラスト回折格子)を用いた VCSEL を提案、試作素子にて SMSR~45dB、CW 発振しきい値 0.5mA を実現し、ハイコントラスト回折格子構造のミラーの有用性を実証した。また、このミラー構造を機械的に変位させることで波長可変レーザを実現している (WB6、University of California, Berkeley、米国)。このハイコントラスト回折格子は、高屈折率差が必要とされる半導体 DBR 反射鏡に替わる新型上側ミラーとして、特に従来 DBR 反射鏡の実現が困難だった材料・波長帯の VCSEL への展開が期待される。

他方、WC1 (Illinois 大、米国) からは 2つの垂直共振器を一体化した複合共振 VCSEL 構造を試作し、-3dB 帯域 12.5GHz を実現している。また、WC5 (Royal Institute of Technology、スウェーデン) では 1.28 μm 帯の VCSEL において上部 DBR 上に 3-5 μm 径の段差構造を設けることで、高出力化とシングルモード発振を両立し、-3dB 帯域 9.5GHz と良好な高速特性を示した。その他、では VCSEL の表面全体を Cu で覆うことで熱抵抗を半減させる構造 (WC7、Novalux、米国) による高速性の改善が報告された。また、980nm 帯のサブモノレーヤ構造の量子ドット VCSEL において、85°C で 20Gbps のエラーフリー動作が報告された (WC3、Technische Universitaet Berlin、ドイツ)。サブモノレーヤ構造の量子ドットが量子井戸に比べてどのような優位性を有しているのか現状では明らかになっていないようだが、このような最高性能が量子ドットで実現されたことは一つのエポックと言えるのではないだろうか。

7. Novel Structure & Photonic Crystal lasers

一風、斬新な構造の新型レーザが提案された。Stanford 大からは、コア領域を残してクラッド層を部分的に除去したガラスファイバを III/V 活性層に貼り付けたエバネッセント光結合型半導体レーザが提案された (ThA1、Stanford 大、米国)。また、Si の SOI 基板上に貼り付けた InGaAsP 系マイクロディスクレーザの電流注入による発振は (ThA2、横浜国大)、今後の Si-Photonics の要素技術としても大変興味深い。

8. 量子ドットレーザ

Surrey 大の Massé 等は、富士通の作成した InAs 量子ドットレーザの温度特性を詳細に調べることにより、キャリアの再結合過程と利得プロセスに関する興味深い考察を報告した。スペーサ層を P 型およびアンドープとした InAs 量子ドットレーザのしきい値電流の温度特性を詳細に調べ上げた結果、Auger 効果とド

ットの不均一性が現状の量子ドットレーザの性能を律速していると結論付けた (ThB1、Surrey 大、英国)。また、VCSEL の項でも述べた 980nm 帯サブモノレーヤ構造の量子ドット VCSEL の 85°C で 20Gbps のエラーフリー動作 (WC3、Technische Universitaet Berlin、ドイツ) は、量子ドットレーザの進展の中でも触れるべき重要な進展である。

この他、量子ドットのモードロックレーザへの応用が注目されており、本会議では報告の半分がこれに占められていた。ThB3 (NL Nanosemiconductor GmbH、ドイツ) からはパッシブモードロックレーザの報告が行われた。MBE 成長の InAs 量子ドットにて繰り返し 5GHz、パルス幅 3.2ps、ピークパワー 1.7W の高出力発振が得られている。

9. GaInNAs レーザと関連技術

ThC3 (HIATCHI) では GaInNAs 活性層を用いた最高性能のエッジエミッターレーザが報告された。GaInNAs 活性層に不純物となる Al を混入させないような MBE 結晶性の工夫を施した結果低しきい値改善 (しきい電流 4.4mA@25°C、9.4mA@100°C、特性温度 115K) が波長 1.29 μ m で実現された。GaInNAs については他にも多数報告があった。ThC6 (Chalmer 大) から MBE 成長の GaInNAs-DQW レーザにて特性温度 230K (25-110°C@L=580 μ m) および 110°C での 10Gbps 動作実現の報告があった。また P9 (住友電工) では、MOVPE 成長の GaInNAs 埋め込み型 DFB レーザでの CW 発振の報告があり、GaInNAs レーザ特性の着実な進展が見られた。

一方、ThC1 (NTT) では Traveling Liquidus-Zone (TLZ) 法と呼ぶ新規基板引き上げ技術により、In 組成 10% の InGaAs 基板を作製した。その基板上に InGaAs 井戸を有する三重量子井戸レーザ構造を MOVPE 法で成長した。しきい電流は 19mA@25°C と若干高いが特性温度 130K(25-95°C)、95K(95-155°C) と良好な高温特性を実現している。

10. Si-Photonics 関連

冒頭でも述べたように Intel からラマン励起を利用した Si レーザが報告された。ラマン励起光を用いるハイブリッド構成ではあるが、副モード抑圧比 70dB、スペクトル線幅 100kHz 以下のスペクトル高純度を生かした新展開が期待できるとのことであった。この他、Rump Session では “Light emission from silicon: concepts and prospects” と題して University of California Santa Barbara の Prof. John Bowers のオーガナイズで Si 上への III - V 族集積を中心に議論が展開された。InP 系の他 GaSb 系半導体の集積や小型集積、低コスト化などの Si を用いる優位性等についても議論された。ポストデッドラインでは UCSB から InP 系発光層を SOI 基板上へ貼り付けた Si/InP ハイブリッドレーザについて報告された。所謂 Si レーザの電流注入励起での発振を世界初で実現した。15°C で 1.8mW のファイバー結合出力を得ており、発振波長は 1577nm であった。また、40°C までの CW 発振と 80°C までのパルス発振を実現していた。既に、受光素子と光変調器とを Si 上に形成する基礎技術があるため、光源も Si 上に形成できれば三位一体技術ができることになる。半導体レーザ会議で、Si フォトニクスが正式に取り上げられたことはエポック的と感じたが、学会参加者が「III - V 族」の集団と言うことで、Si の直接発光が議論されることはなかった。

◆終わりに

前述のように今回の ISLC2006 では、Si フォトニクスが初めて ISLC の議題として本格的に取り上げられ

たことが大きな特徴であった。ランプセッションでは数多くの活発な質疑応答が行われ、夜 10 時過ぎまで議論が行われるなど、盛況であった。また、ポストデッドラインペーパーとして Intel から、InP 系量子井戸活性層を SOI 基板上のリッジ導波路に張り合わせた Si/InP ハイブリッドレーザが報告され注目を集めていた。

次回第 21 回会議の開催は 2 年後の 2008 年に開催予定。開催地は最終決定していないが、スイス、イタリア圏での開催の方向の模様である。最近の本会議参加者数の推移は 334 名@1998 Nara、315 名@2000 Monterey の後、160 名@2002 Garmisch-Partenkirchen、204 名@2004 Matsue、134 名@2006 Hawaii と参加者の減少傾向が心配される。光通信市場の完全復調、次世代光ディスクの進展等の市場活性と共に、特に Si/III-V 発光技術の進展により、次回 21st ISLC では再び本会議が活性化することを期待したい。