マイクロ固体フォトニクス
研究会
第10 回 レーザー学会
「小型集積レーザー(II)」
専門委員会

2026年9月16日
分子科学研究所

RICOH
imagine. change.

動的横モード分布制御（Γ switch）による選択酸化型VCSELの数十ps短パルス発生法

リコー　技術本部
先端技術研究センター
次世代技術研究室

軸谷 直人
naoto.jikutani@jp.ricoh.com

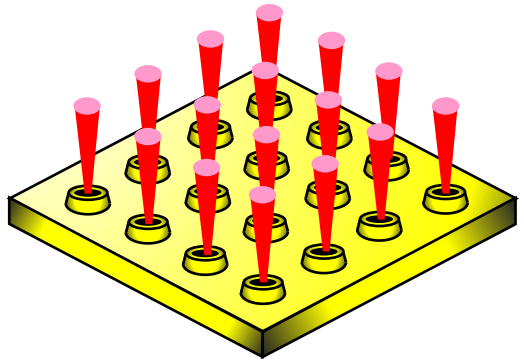
アウトライン

RICOH
imagine. change.

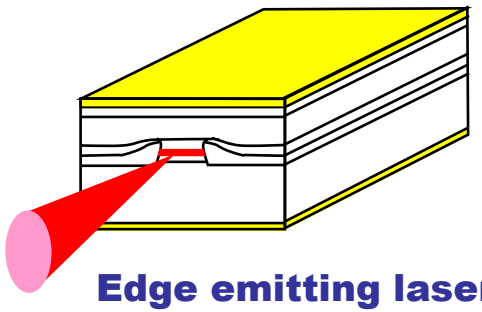
- 背景
- 提案コンセプト
- VCSEL構造設計
- デバイス特性
- まとめ

面発光レーザと端面発光型レーザの特徴比較

RICOH
imagine. change.



面発光レーザー：VCSEL



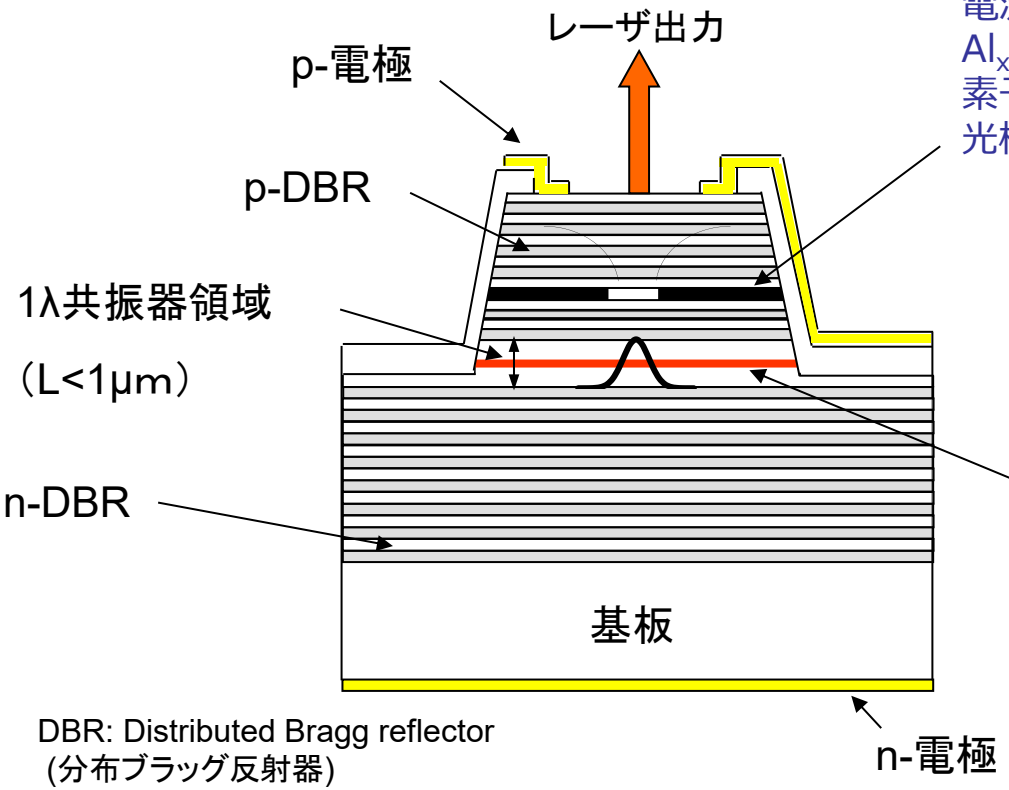
Edge emitting laser

	端面発光型レーザ	面発光レーザ
出射(共振)方向	基板に並行	基板に垂直
活性層体積	厚さ:十数nm,面積:数万μm^2	厚さ:十数nm,面積:数十μm^2
閾値電流（消費電力）	大（I_{th}~数十mAオーダー）	小（I_{th}~μA, mAオーダー）
共振器長	300～1000 μm	1 μm以下（一波長：λ/n ）
発振縦モード	マルチモード	単一モード
放射ビーム形状	楕円	円形（狭ビーム）
波長の温度安定性	悪い（～0.5 nm/K） （ゲインピークシフトによる）	良い（～0.05 nm/K） （共振器屈折率変化による）

面発光レーザと端面発光型レーザの構造比較

RICOH
imagine. change.

Vertical Cavity Surface Emitting Laser
(面発光レーザ素子)



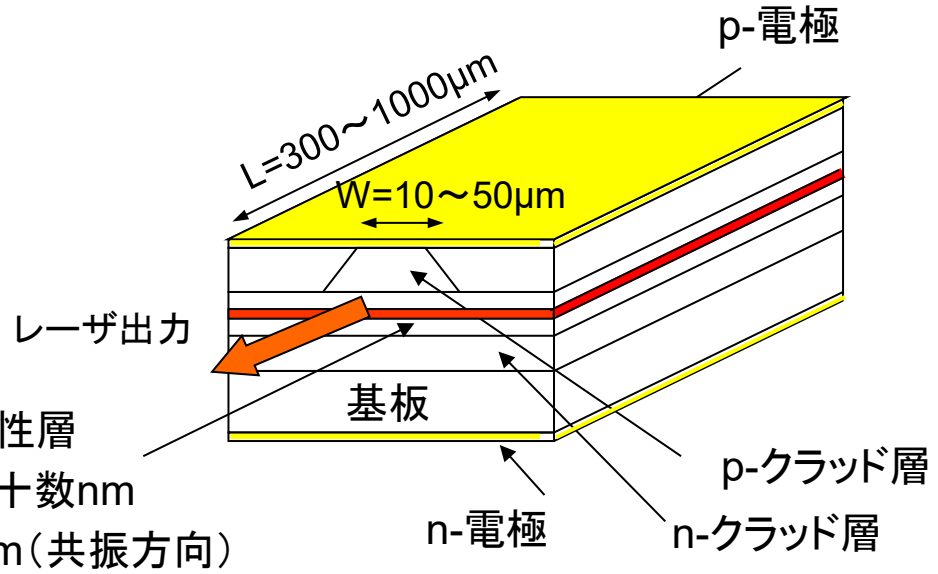
電流狭窄層
$Al_xGa_{(1-x)}As$ (x>0.98)を水蒸気中で選択酸化
素子中央部へのキャリア（正孔）の狭窄と、
光横モードの閉じ込め作用を有し、低閾値電流での発振を実現

活性層
厚さ:十数nm（共振方向）
直径:数μm(電流注入領域)

DBR: Distributed Bragg reflector
(分布ブラッグ反射器)

活性層厚さが共振方向に十数nmしかなく光学利得が小さい為、
99.9%以上の高反射率が必要。半導体分布ブラッグ反射器が主流
。

Edge emitting laser
(端面型発光レーザ素子)



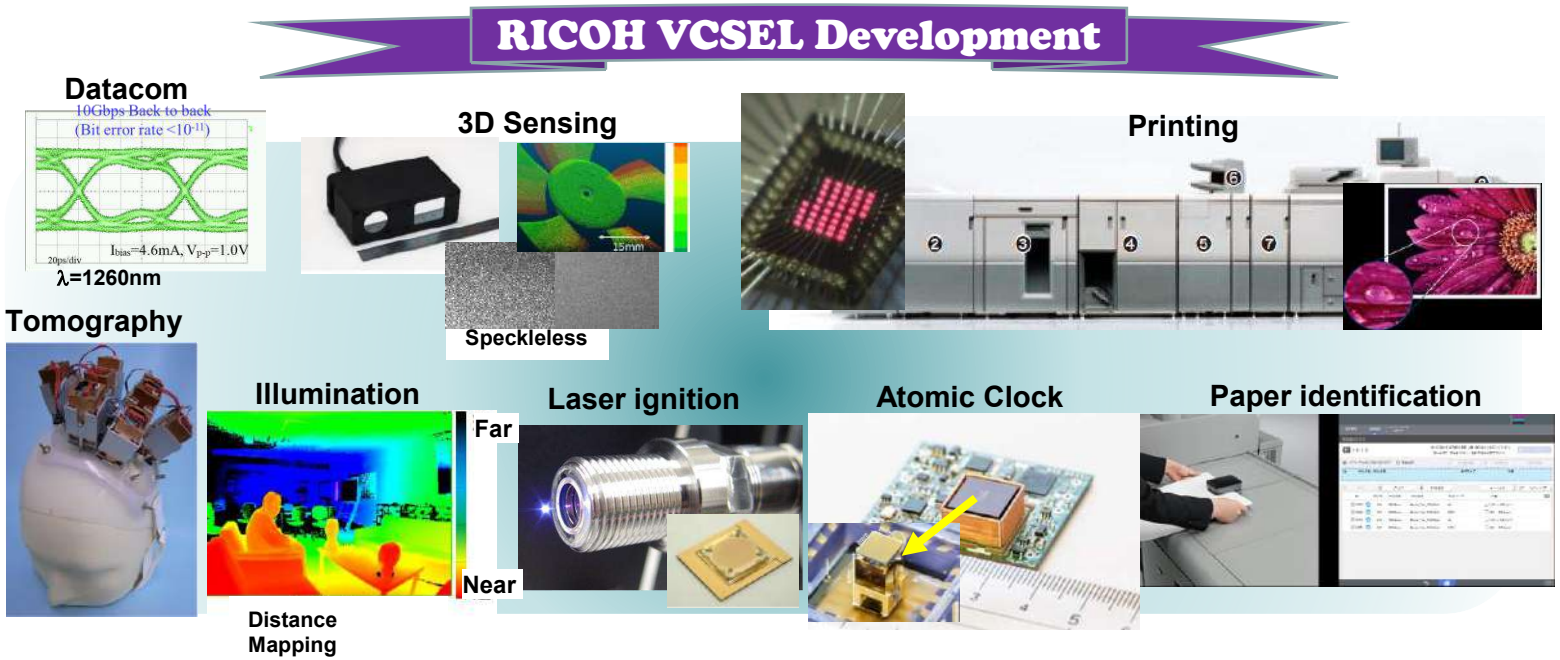
背景：VCSELの特長と当社における開発

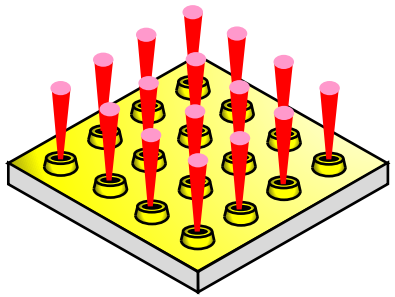
RICOH
imagine. change.

- VCSELは1977年に東京工業大学の伊賀健一先生によって発明された。

  Iga, K., "VCSEL: born small and grown big," Proc. SPIE 11263, 1126302 (2020).

- VCSELの特徴
  - 低閾値電流
  - 低消費電力
  - 円形ビームce
  - 単一縦モード発振
  - 優れた波長安定性
  - 2次元アレイ化が容易
  - 劈開工程不要
  - ウエハレベル評価が可能

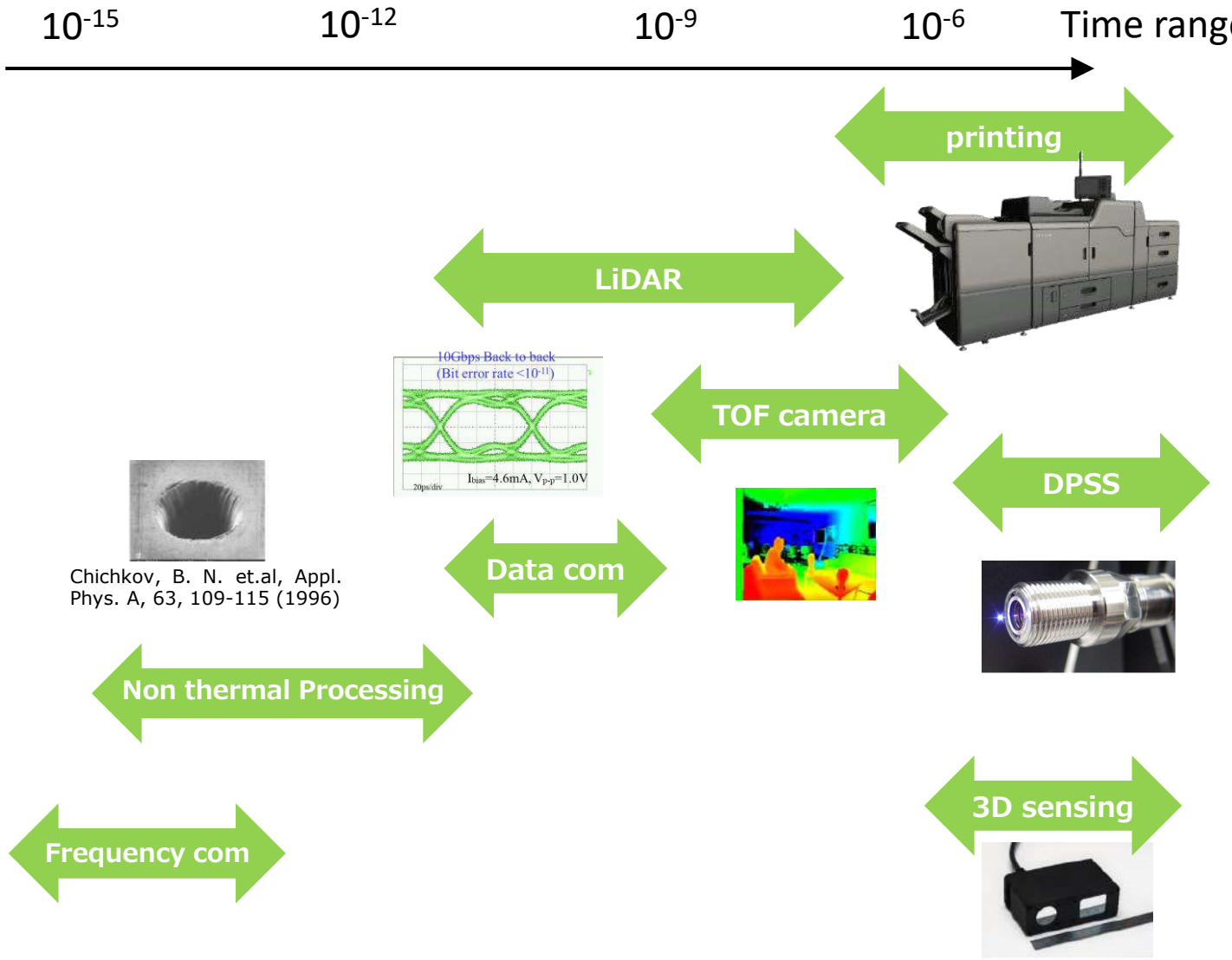




VCSELは二次元アレイ構造などの特長を有しており、端面発光レーザーでは実現が困難であった新たな応用展開を可能にしている。

パルス幅とVCSELの応用領域

RICOH
imagine. change.

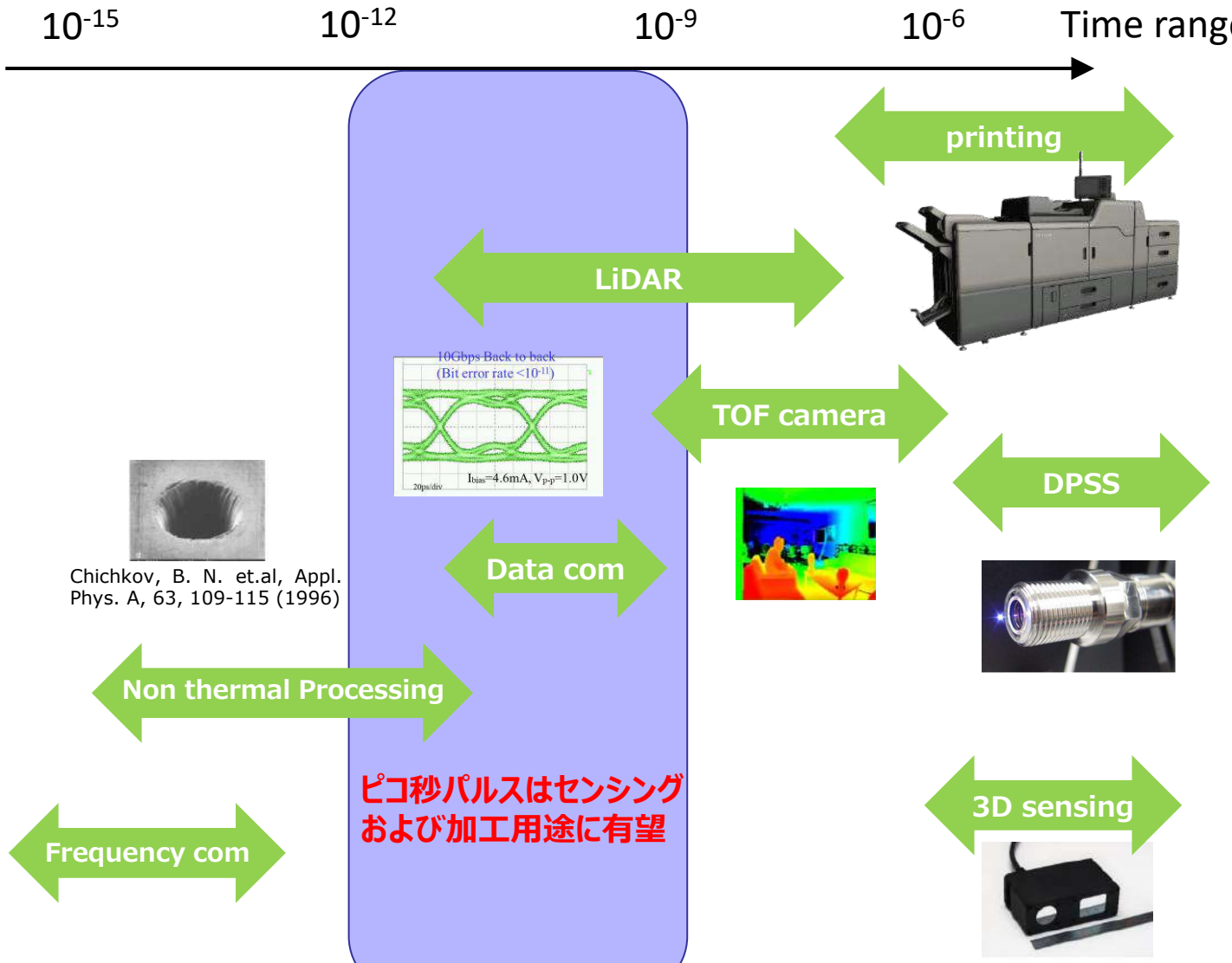


- ＞ナノ秒パルス領域
  - 直接変調
    - 電流注入変調
- ピコ秒パルス領域
  - ゲインスイッチ
    - 緩和振動
  - Qスイッチ
    - 可飽和吸収体 (QW)
- フェムト秒パルス領域
  - モードロック
    - 可飽和吸収体(SESAM)

Semiconductor saturable absorber mirror

パルス幅とVCSELの応用領域

RICOH
imagine. change.



- ＞ナノ秒パルス領域
  - 直接変調
    - 電流注入変調

- ピコ秒パルス領域
  - ゲインスイッチ
    - 緩和振動
  - Qスイッチ
    - 可飽和吸収体 (QW)

- フェムト秒パルス領域
  - モードロック
    - 可飽和吸収体(SESAM)

Semiconductor saturable absorber mirror

ゲインスイッチの原理

RICOH
imagine. change.

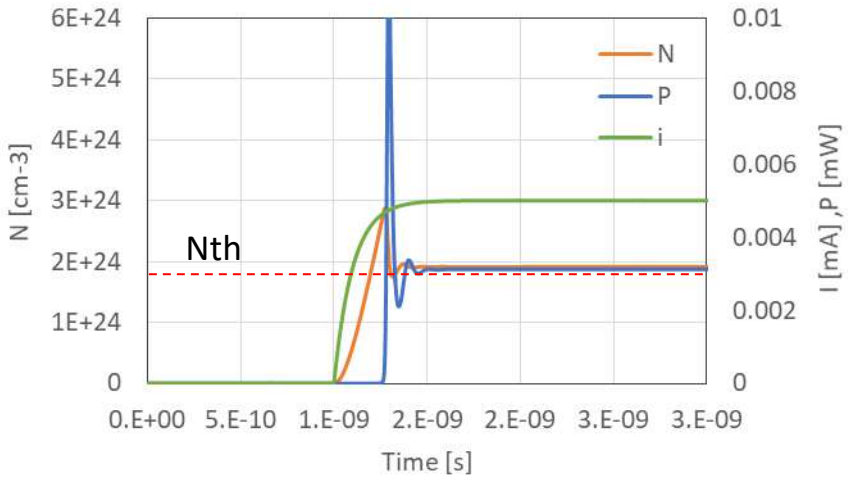
レーザー動作のレート方程式:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{i}{qV} - v_g\, g(N)S - \frac{N}{\tau(N)}$$

$$\frac{dS}{dt} = v_g\,(\Gamma g(N) - \alpha)S + \Gamma\beta\frac{N}{\tau(N)}$$

N: キャリア密度
i: 電流
q: 電荷素量
V: 活性層体積
v_g: 群速度
$\tau(N)$: 自然放出寿命
β: 自然放出結合係数
$g(N)$: 利得
S: 光子密度
Γ:光閉じ込め係数
α: 共振器損失

短パルスを得るためには、誘導放出が支配的になる前に活性層内へキャリアを蓄積する必要がある。



VCSELの電流注入型ゲインスイッチ動作において、
28.5 ps（73 mW）[1]、
24.0 ps（10mW）[2] 、
4.6 ps[3]の短パルス動作が報告されている

1.Lin, J., Gamelin, J.K., Wang, S., Hong, M. and Mannaerts, J.P., Electron. Lett, vol. 27, no. 21, 1956-1958 (1991).
2. Wiesenfeld, J. M., Hasnain, G., Perino, J.S., Wynn, J.D., Leibenguth, R.E., Wang, Y.-H. and Cho, A.Y., IEEE J. Quantum Electron., vol. 29, no. 6, 1996-2005 (1993).
3. Pepeljugoski, P., Cutrer, D. and Lau, K., Electron. Lett. Vol. 30, no. 6, 491-492 (1994).

・ゲインスイッチ：電流パルス立上り時に、光子密度 s が小さい状態でキャリアを蓄積する手法

Qスイッチの動作原理

RICOH
imagine. change.

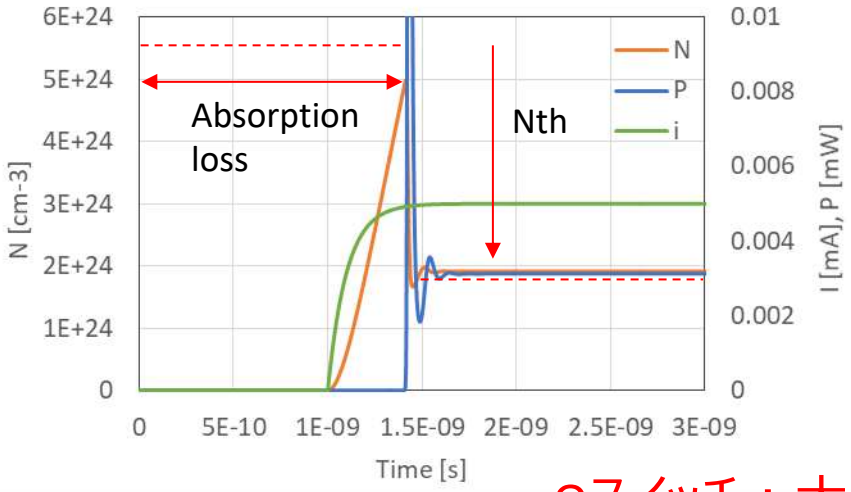
レーザー動作のレート方程式:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{i}{qV} - v_g\, g(N)S - \frac{N}{\tau(N)}$$

$$\frac{dS}{dt} = v_g\,(\Gamma g(N) - \alpha)S + \Gamma\beta\frac{N}{\tau(N)}$$

N: キャリア密度
i: 電流
q: 電荷素量
V: 活性層体積
v_g: 群速度
$\tau(N)$: 自然放出寿命
β: 自然放出結合係数
$g(N)$: 利得
S: 光子密度
Γ:光閉じ込め係数
α: 共振器損失

短パルスを得るためには、誘導放出が支配的になる前に活性層内へキャリアを蓄積する必要がある。



VCSELのQスイッチ動作において、
40 ps[1]、
150 ps[2]、
200 ps[3] の短パルス動作が報告されている

1. Eisden, J. van, Yakimov, M., Tokranov, V., Oktyabrsky, S., Mohammed, E.M. and Young, I. A., 2006 CLEO, 1-2, (2006).
2. Fischer, A. J., Chow, W. W., Choquette, K. D., Allerman, A. A. and Geib, K. M., Appl. Phys. Lett. 76, 1975 (2000).
3. Berry, G., Summers, H., Matthews, D. and Blood, P., '99 CLEO, 456-457 (1999).

・Qスイッチ：大きな吸収損失 α によって光子密度 S を低く抑え、キャリアを蓄積する手法

提案コンセプト

RICOH
imagine. change.

レーザー動作のレート方程式:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{i}{qV} - v_g\, g(N)S - \frac{N}{\tau(N)}$$

$$\frac{dS}{dt} = v_g\,(\Gamma g(N) - \alpha)S + \Gamma\beta\frac{N}{\tau(N)}$$

N: キャリア密度
i: 電流
q: 電荷素量
V: 活性層体積
v_g: 群速度
$\tau(N)$: 自然放出寿命
β: 自然放出結合係数

$g(N)$: 利得
S: 光子密度
Γ:光閉じ込め係数
α: 共振器損失

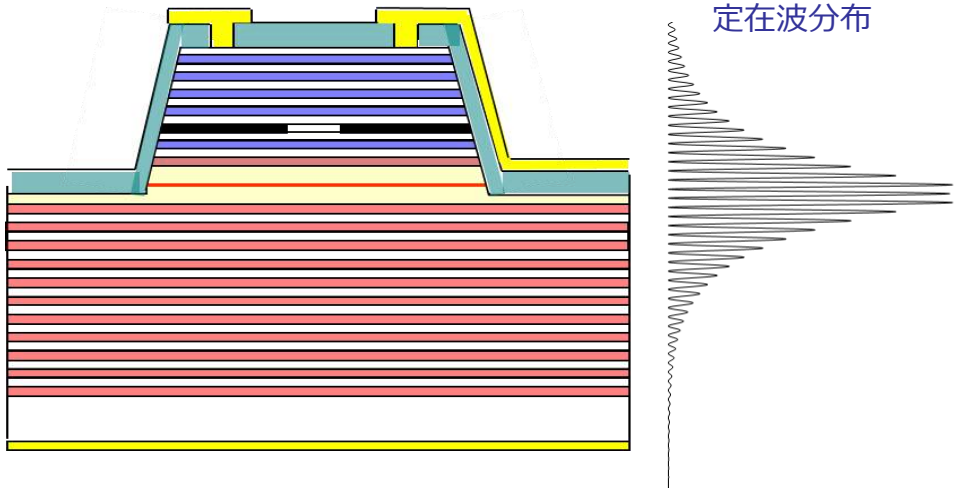
短パルスを得るためには、誘導放出が支配的になる前に活性層内へキャリアを蓄積する必要がある。

本研究では、光閉じ込め係数Γを低減することによって誘導放出を抑制し、
キャリアを蓄積する手法を提案する。
（小さなΓによっても誘導放出を抑制できる）

$\Gamma = \Gamma_{vertical} \times \Gamma_{lateral}$

縦方向光閉じ込め係数 $\Gamma_{vertical}$ を用いた従来手法

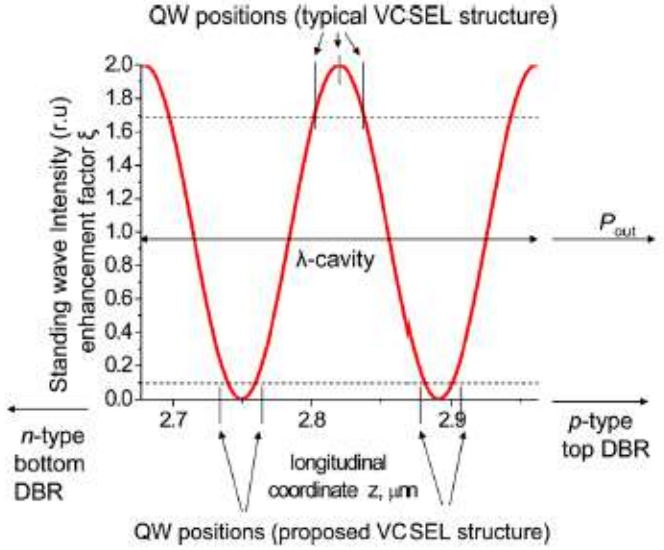
RICOH
imagine. change.



縦方向光閉じ込め係数 $\Gamma_{vertical}$ の特性

$\Gamma_{vertical}$ は、定在波分布と活性層位置によって決定される。
そのため、$\Gamma_{vertical}$ を動的に制御することは困難である。

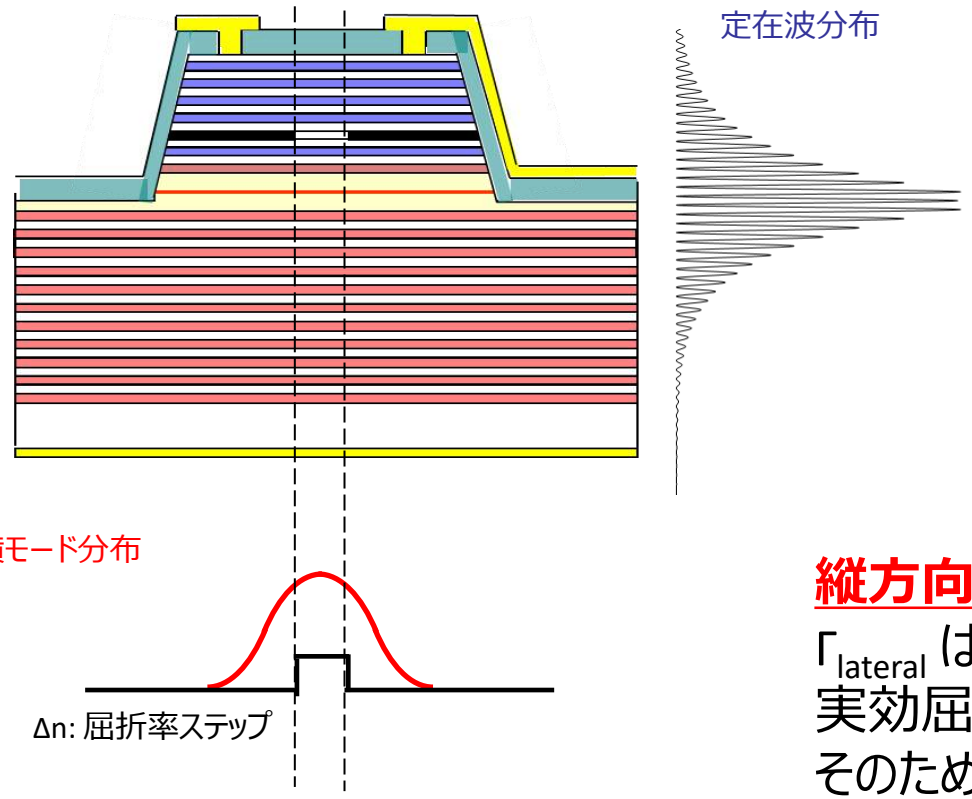
しかしながら、$\Gamma_{vertical}$ により発振前のキャリア蓄積量を制御することができる。$\Gamma_{vertical}$ を小さくすることで、多くのキャリアを蓄積でき、高ピーク出力のゲインスイッチパルスが得られることが報告されている。[1][2]



誘導放出速度を制御する
従来手法

1.Ryvkin , B., Avrutin, E. A. and Kostamovaara, J. T., IEEE J. Light. Technol., vol. 27, no. 12, 2125-2131 (2009).
2.Ryvkin , B., Avrutin, E. A. and Kostamovaara, J. T., J. App. Phys., 110, 123101 (2011).

「$_{lateral}$ を用いた新しいコンセプト



縦方向光閉じ込め係数「$_{vertical}$の特性

「$_{vertical}$は、定在波分布と活性層位置によって決定される。
そのため、「$_{vertical}$ を動的に制御することは困難である。

しかしながら、「$_{vertical}$ により発振前のキャリア蓄積量を制御することができる。「$_{vertical}$を小さくすることで、多くのキャリアを蓄積でき、高ピーク出力のゲインスイッチパルスが得られることが報告されている。[1][2]

縦方向光閉じ込め係数「$_{lateral}$の特性

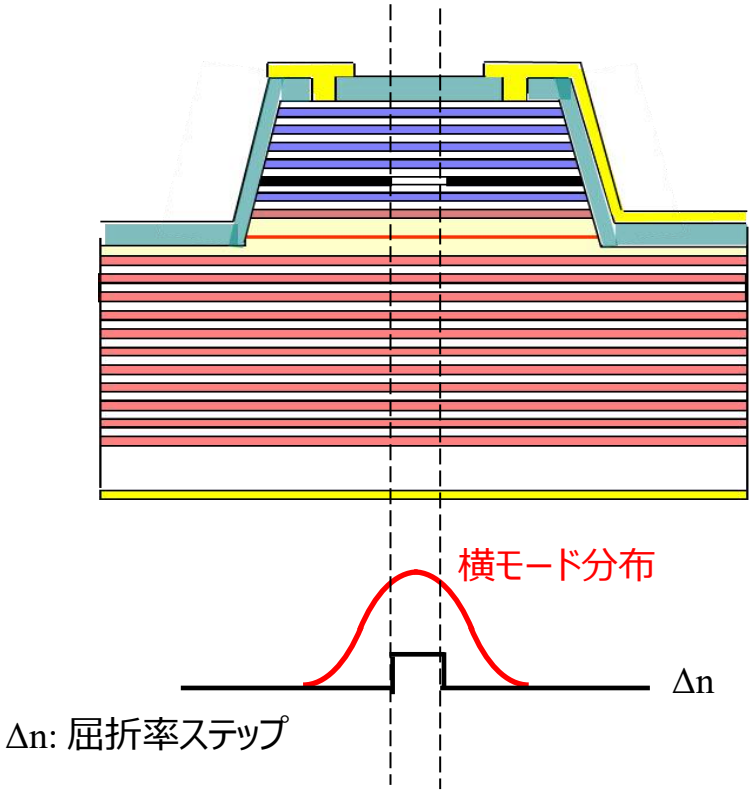
「$_{lateral}$ は選択酸化型VCSELにおける屈折率ステップによって主に決定される。
実効屈折率差は10^-3オーダーと小さい。
そのため、わずかな屈折率変化によって制御可能である。

キャリアプラズマ効果による横モード分布スケールの制御により、誘導放出を抑制してキャリアを蓄積する手法を提案する。本動作を「**「-switch**」と命名した。
N. Jikutani and K. Harasaka, Proc. of SPIE Vol. 12020, 1202004

電流注入(キャリアプラズマ効果)による横モード制御

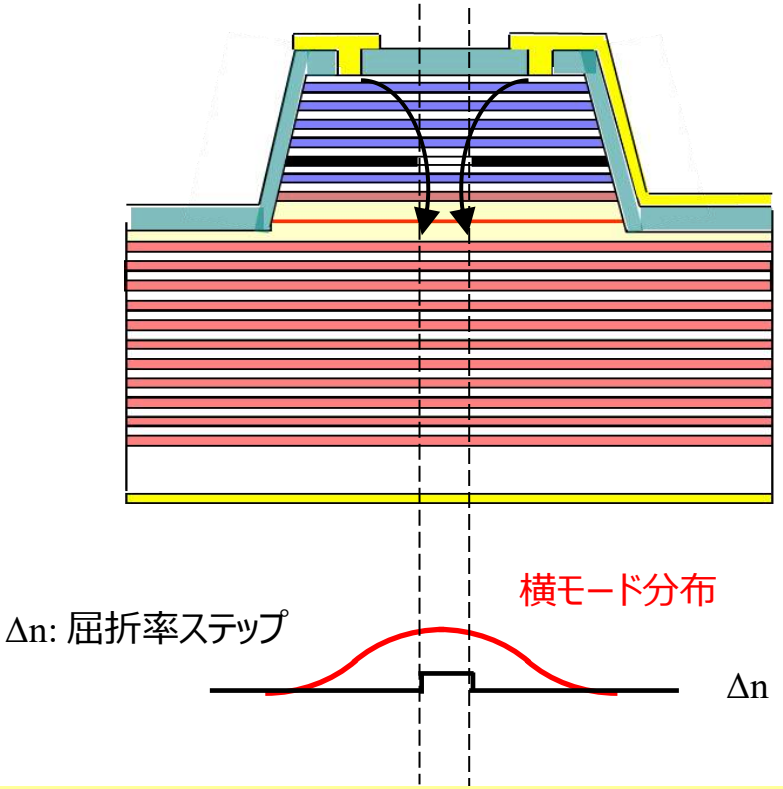
RICOH
imagine. change.

電流注入前、及び電流注入後



電流注入時

キャリア密度の増加に伴うキャリアプラズマ効果によって、
酸化開口(OA)近傍の屈折率が低下する。

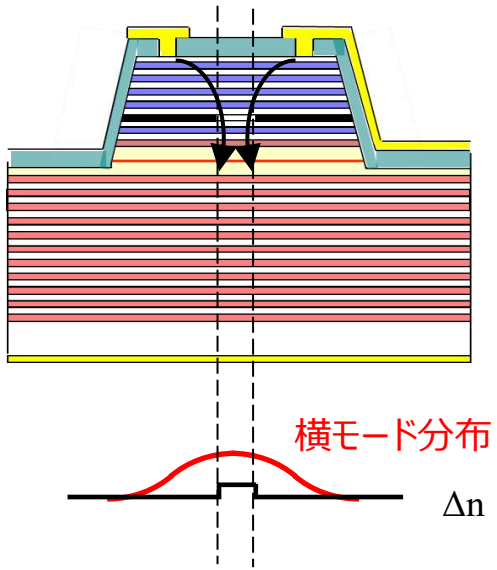


Δnの減少により、横モード分布は広がり、利得領域における光密度が低下する

「スイッチ による短パルス発振原理

RICOH
imagine. change.

電流注入時

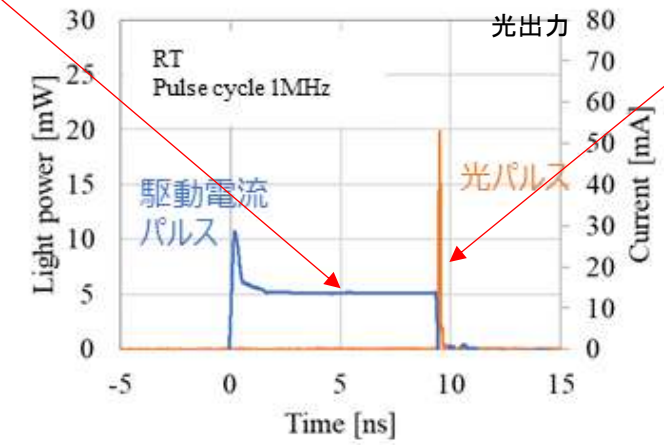


電流が流れるとキャリアプラズマ効果
により電流経路の屈折率が減少する

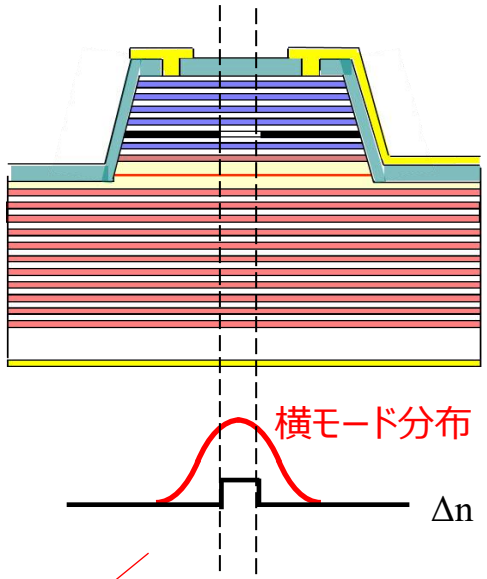
横モード分布が広がり（光強度が低下し）
誘導放出が抑制されてキャリアが蓄積される

弱い光閉じ込めによって
横モード分布を制御する

Δn: 屈折率ステップ



電流注入前、及び電流注入後



電流が停止すると屈折率が元の値へ回復する
（大きくなる）

横モード分布が中央に収束し（光強度が増加し）
蓄積されていたキャリアで短パルス発振が発生する

コンセプト実現のための酸化膜構造

RICOH
imagine. change.

提案コンセプトを実現するには、弱い光閉じ込め構造が必要である。

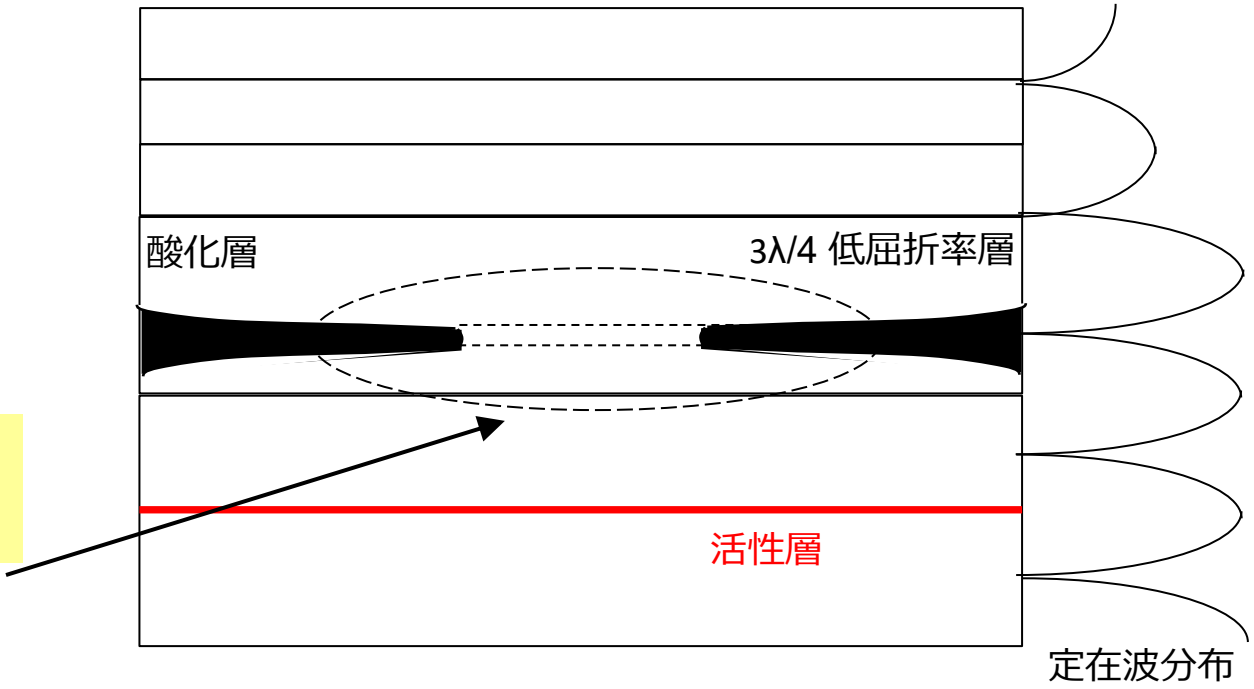
酸化膜構造を以下のように設計した:

profile
・酸化先端部近傍の酸化膜厚を薄くする
（エピ層厚とほぼ同程度）

・徐々に膜厚が増加するテーパー構造とする

横モード閉じ込めに寄与する領域では、酸化膜厚を薄く維持する

酸化層断面の模式図



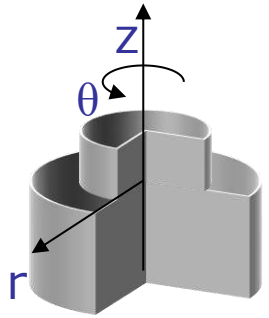
Hegblom, E. R., Margalit, N. M., Fiore, A. and Coldren, L. A., IEEE J. Select. Top. Quantum Electron., vol. 5, No. 3, 553-560 (1999).

基本横モードシミュレーション

RICOH
imagine. change.

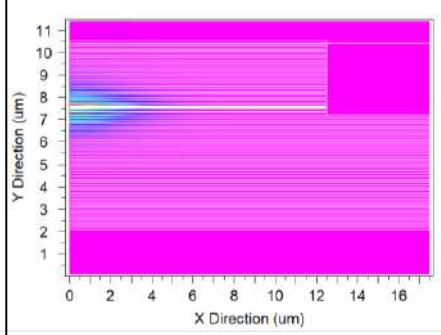
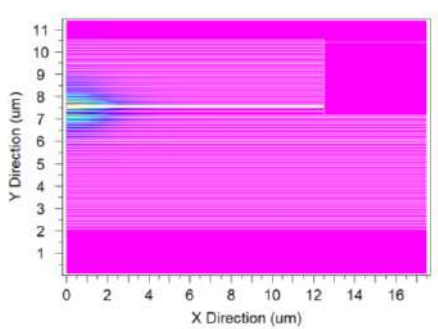
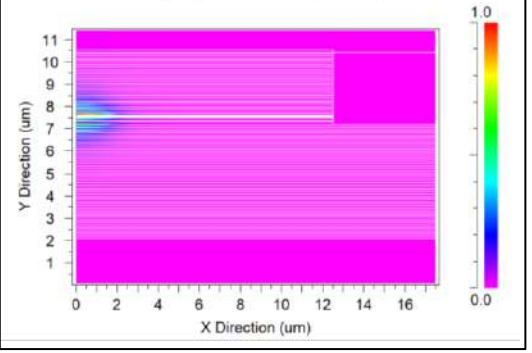
酸化膜構造によるモードサイズ変化を確認するため、モードシミュレーションを実施した。

計算条件:
- 940 nm top emitting
- Cold cavity
- 酸化層厚さは全領域で一定厚さ



Cylindrical coordinate

結果: 基本横モード分布（シミュレーション）

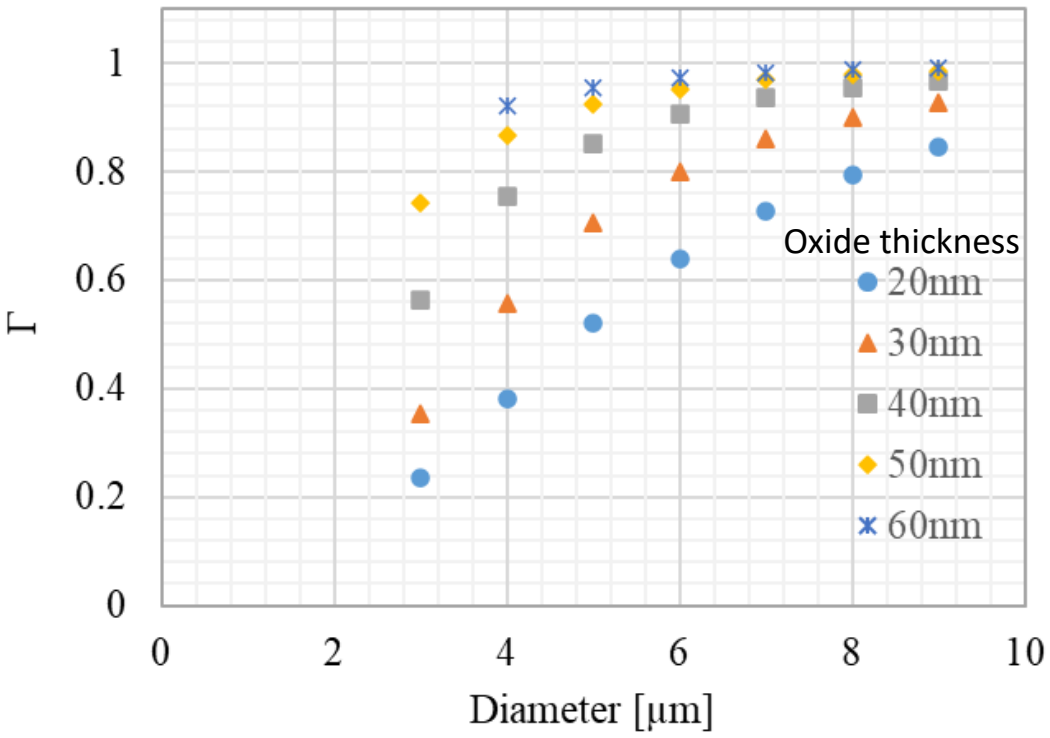
	酸化層厚さ 20nm	30nm	40nm
OA直径 4 μm			

モード広がりは酸化層厚に依存して変化する

横方向光閉じ込め係数Γは電界分布から見積もる事ができる

Γの酸化構造（厚さ）依存性

横モード分布から見積もられた
横方向光閉じ込め係数Γ



Γは酸化層厚さ、OA大きさの増加に伴い増大する

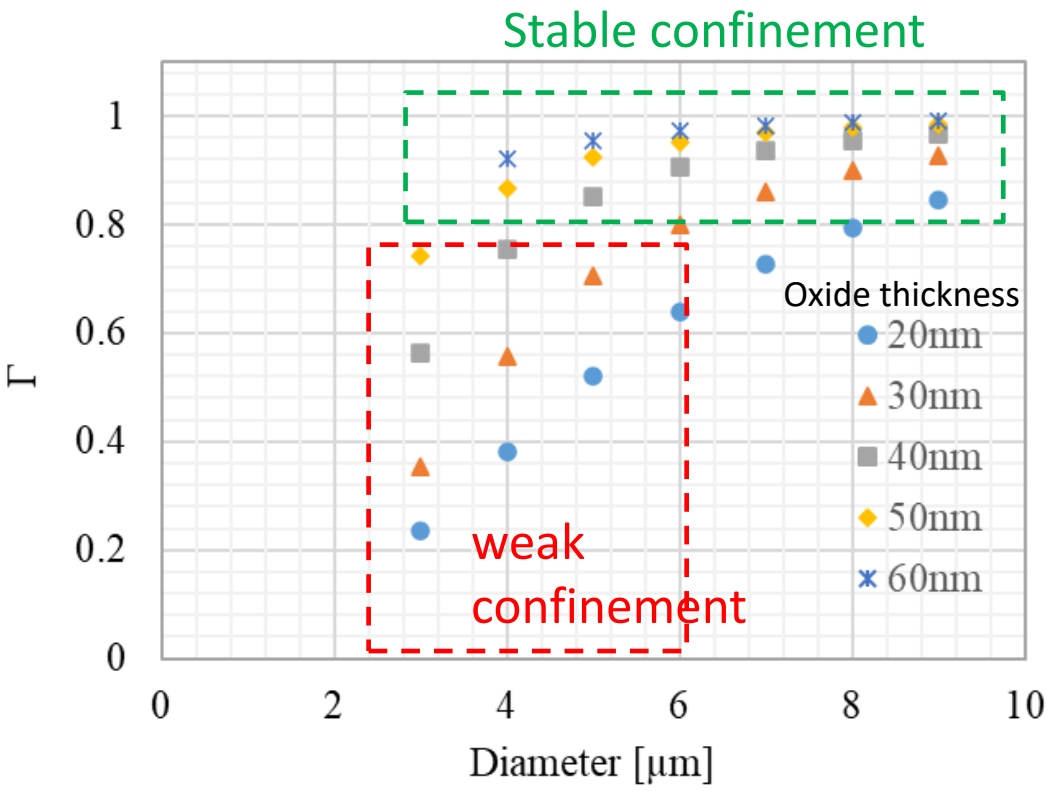
酸化層厚さ　>40nmでは、広いOAレンジにおいて、
安定な閉じ込めが得られている

酸化層厚さ ≤ 40 nm、且つ OA 直径 ≤ 6 μmでは、
酸化層厚さ、OAの変化に対して変化率が大きく、
弱い閉じ込めになってる。

僅かな屈折率変化により、横モード広がりを変化できる
可能性がある。

Γの酸化構造（厚さ）依存性

横モード分布から見積もられた
横方向光閉じ込め係数Γ



Γは酸化層厚さ、OA大きさの増加に伴い増大する

酸化層厚さ　>40nmでは、広いOAレンジにおいて、
安定な閉じ込めが得られている

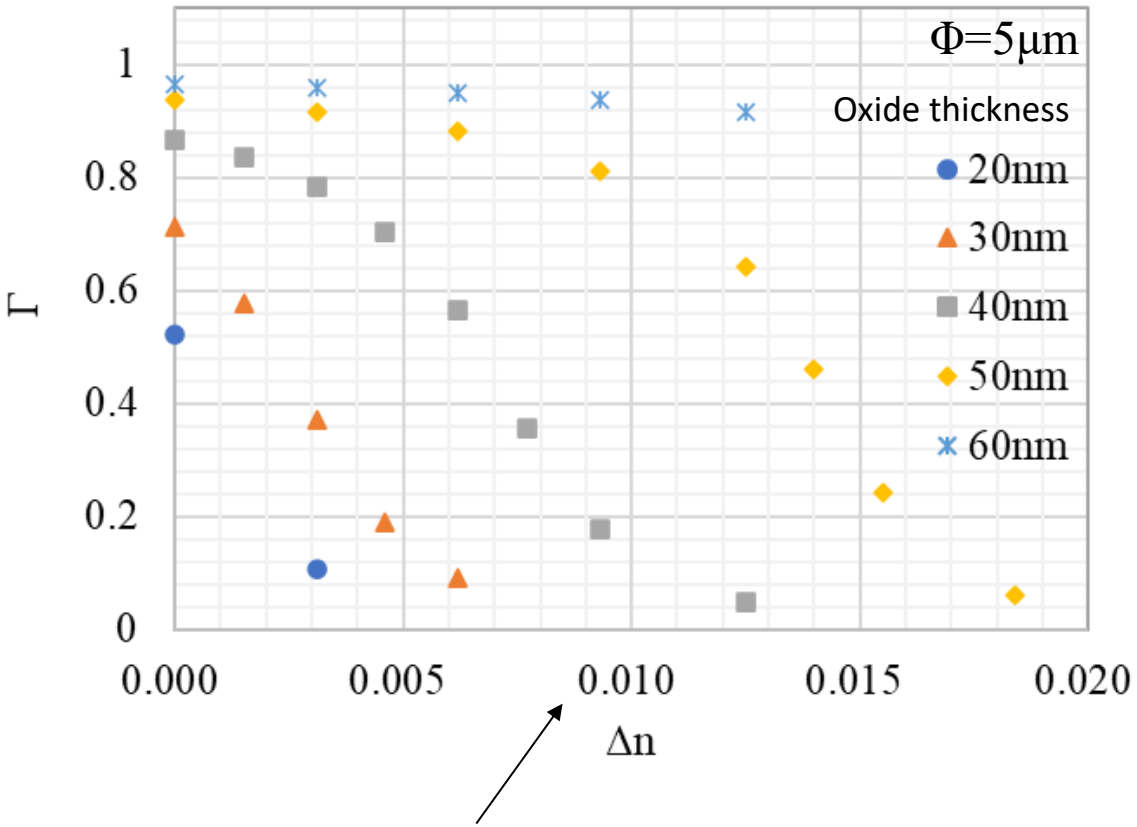
酸化層厚さ ≤ 40 nm、且つ OA 直径 ≤ 6 μmでは、
酸化層厚さ、OAの変化に対して変化率が大きく、
弱い閉じ込めになってる。

僅かな屈折率変化により、横モード広がりを変化できる
可能性がある。

キャリアプラズマ効果による Γ の変調

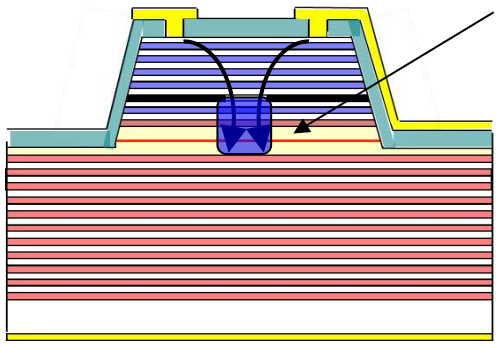
RICOH
imagine. change.

電流通路の屈折率を変化させ、Γの変化を計算した。



$\Delta n = 1\times10^{-2}$ は キャリア密度(Nc) 2×10^{18} cm^{-3} に相当する

計算条件:
- 電流通路（図中青色領域）
- $\Delta n/Nc = -4.4\times10^{-21}\ cm^3$ [1, 2]



Δnにより屈折率が低下した電流通路

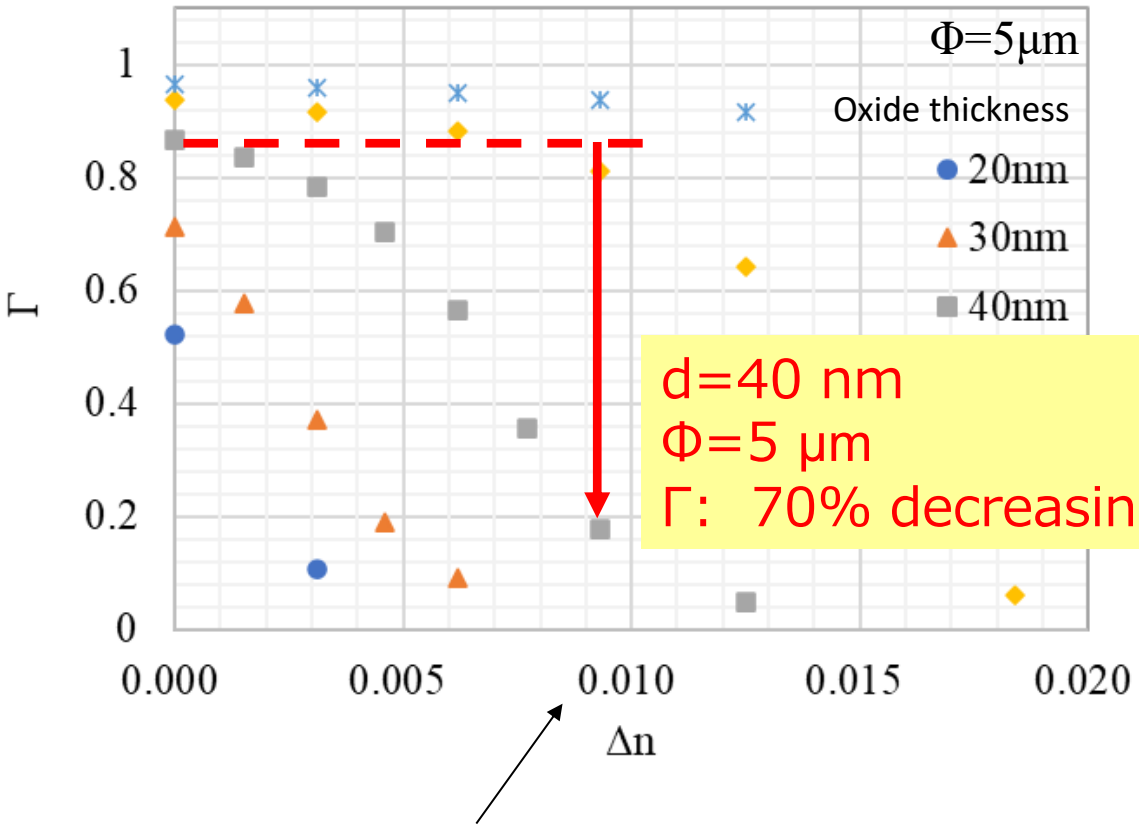
1 .Kobayashi, S., Yamamoto, Y., Ito, M. and Kimura, T., IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 30, no. 4, 428-441 (1982).
2. Ito, M and Kimura, T., IEEE J. Quantum Electron., vol. 16, no. 9, 910-911 (1980).

酸化膜厚が約40 nm以下の場合には、キャリアプラズマ効果に起因するわずかな屈折率変化によっても、Γを大きく変調できる。

キャリアプラズマ効果による Γ の変調

RICOH
imagine. change.

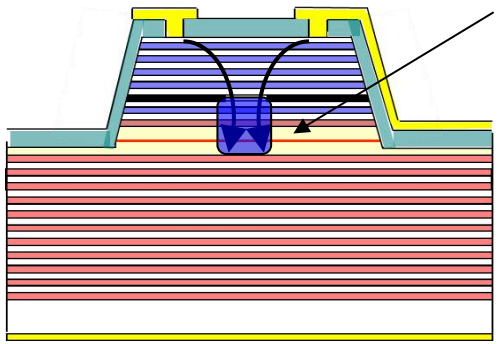
電流通路の屈折率を変化させ、Γの変化を計算した。



d=40 nm
Φ=5 μm
Γ: 70% decreasing

Δn = 1×10^{-2} は キャリア密度(Nc) 2×10^{18} cm^{-3} に相当する

計算条件:
- 電流通路（図中青色領域）
- Δn/Nc= – 4.4×10^{-21} cm^3 [1, 2]



Δnにより屈折率が低下した電流通路

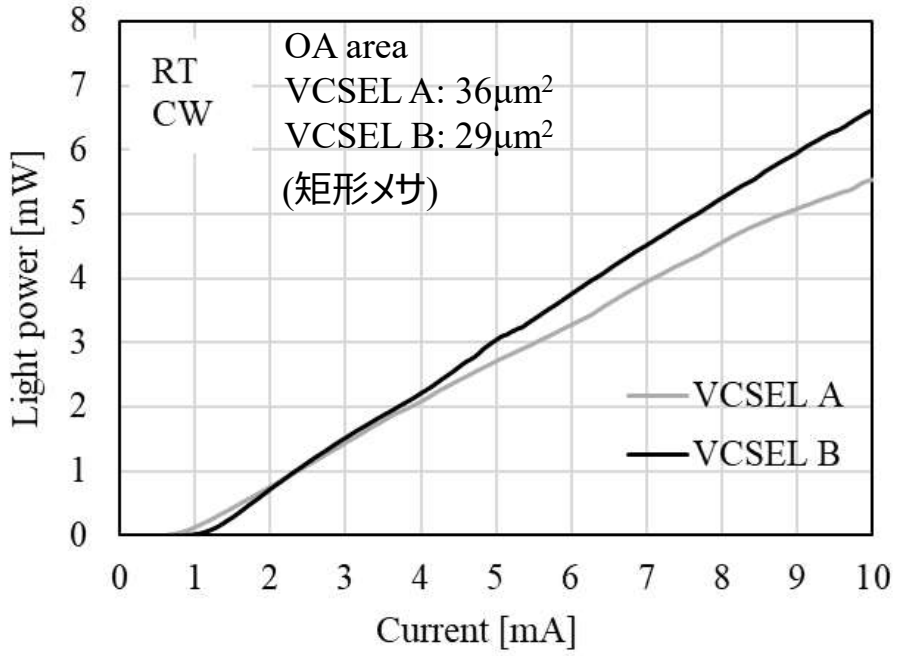
1 .Kobayashi, S., Yamamoto, Y., Ito, M. and Kimura, T., IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 30, no. 4, 428-441 (1982).
2. Ito, M and Kimura, T., IEEE J. Quantum Electron., vol. 16, no. 9, 910-911 (1980).

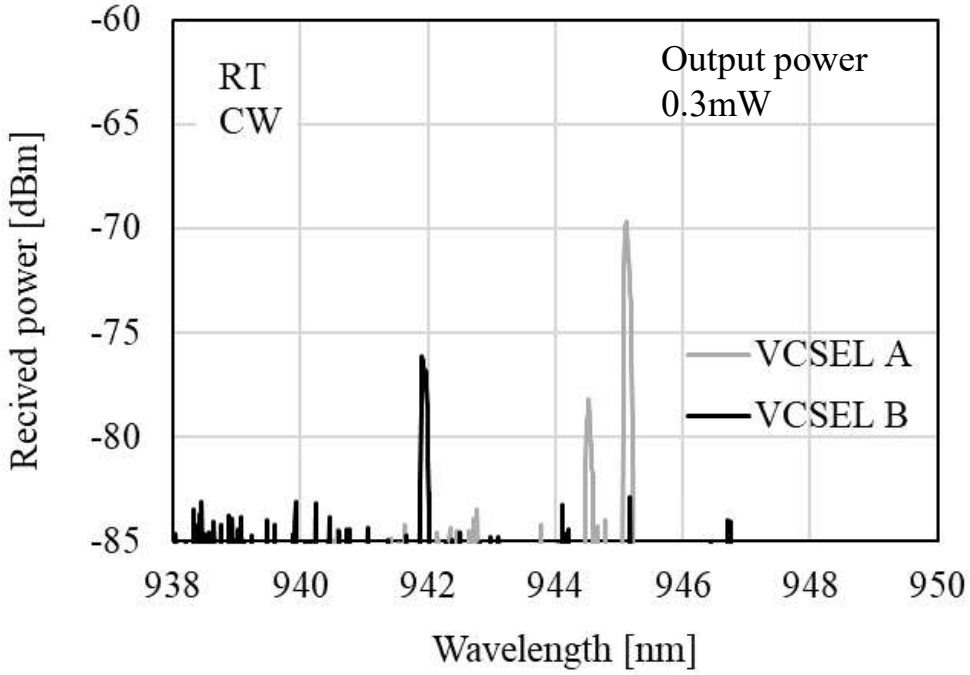
酸化膜厚が約40 nm以下の場合には、キャリアプラズマ効果に起因するわずかな屈折率変化によっても、Γを大きく変調できる。

光閉じ込め係数の異なるVCSELのCW特性比較

RICOH
imagine. change.

光閉じ込めの違いを確認するため、酸化膜プロファイルの異なる2種類の940 nm top emitting VCSELを試作し、CW特性を評価した





Device	I_{th}	SE@0.5 [mW]	Θ@0.3 [mW]
VCSEL A (Γ 大)	0.79 [mA]	0.65 [W/A]	8.5 [deg.]
VCSEL B (Γ 小)	1.11 [mA]	0.87 [W/A]	5.7 [deg.]

VCSELはいずれも矩形メサ構造を有する。

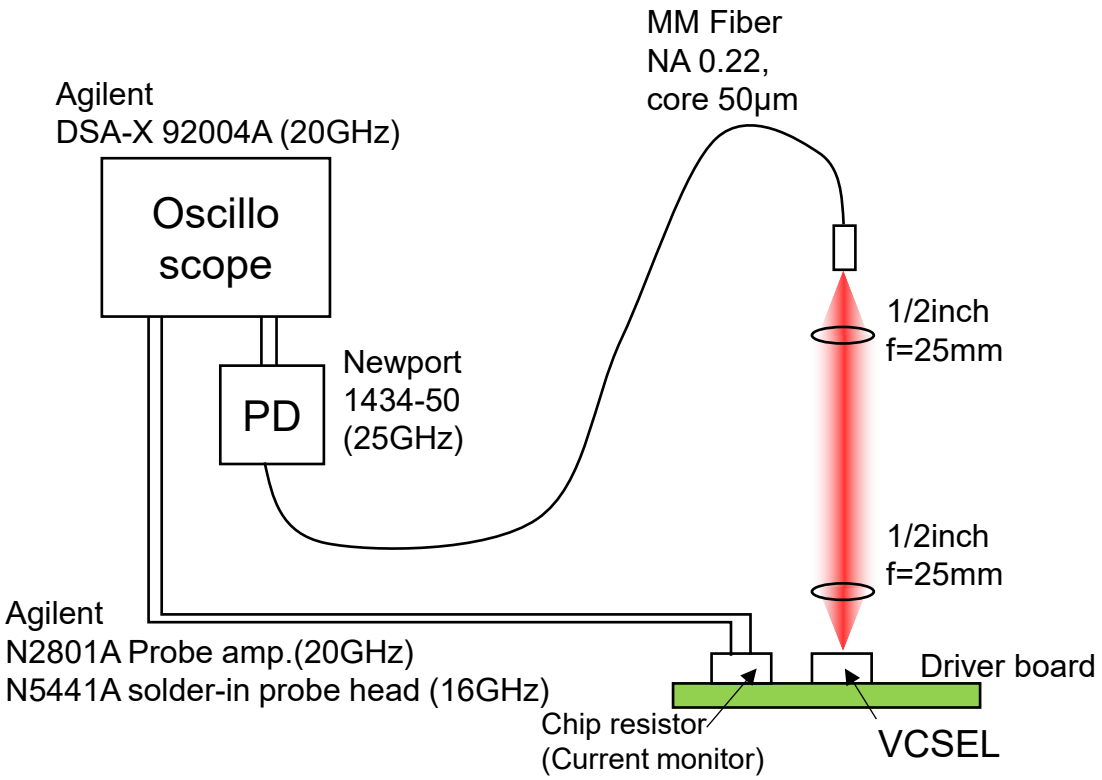
CW特性から、VCSEL Bの方がΓが小さいことが確認できる

VCSEL Bの特性
- 高スロープ効率
- 狭発散角
- シングルモード動作 → 「 小
- 高閾値電流
  (OA面積がVCSEL Aより小さいにも関わらず)

パルス応答評価系

RICOH
imagine. change.

測定系

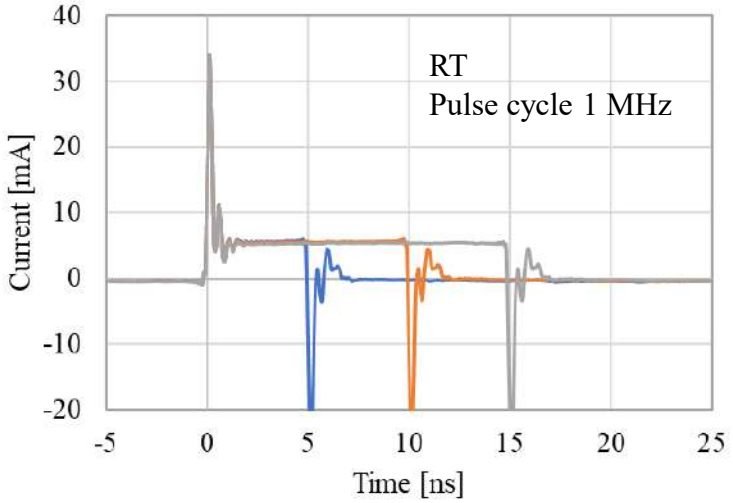


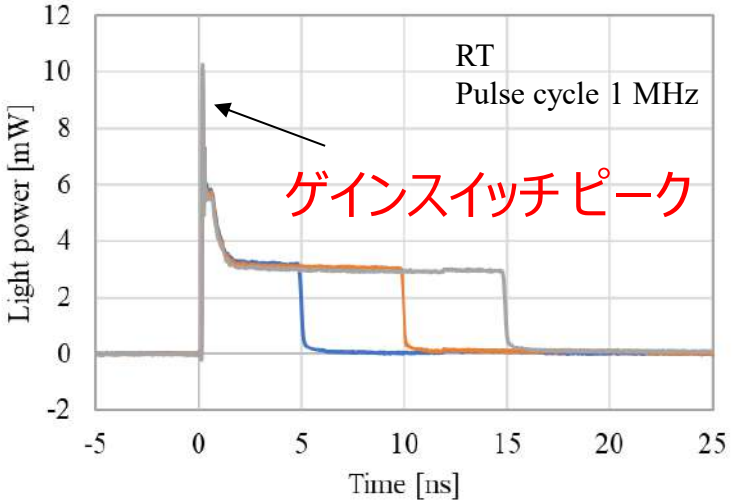
測定系:

- VCSELをドライバ基板上に実装して評価を行った
- 対物レンズを用いて光ファイバ結合した
  (コア径：50 μm、NA：0.22)
- PDの帯域幅：25 GHz
- オシロスコープの帯域幅 20 GHz
- しきい値以下のDCバイアス条件で駆動
- 繰返し周波数：1 MHz

パルス応答

VCSEL A with large Γ



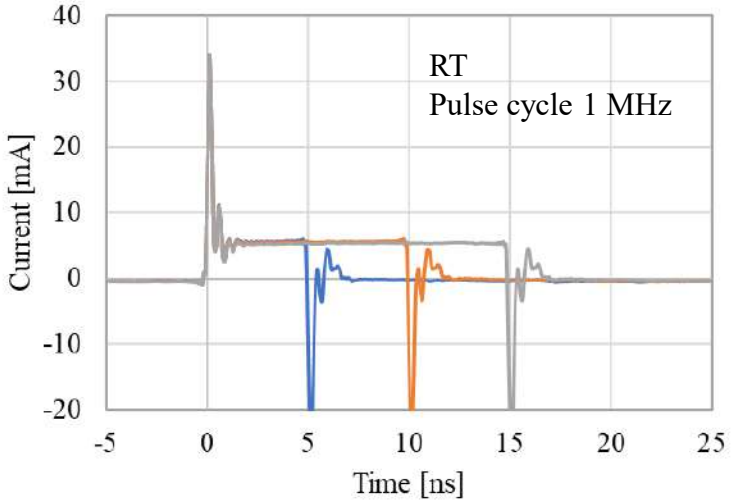


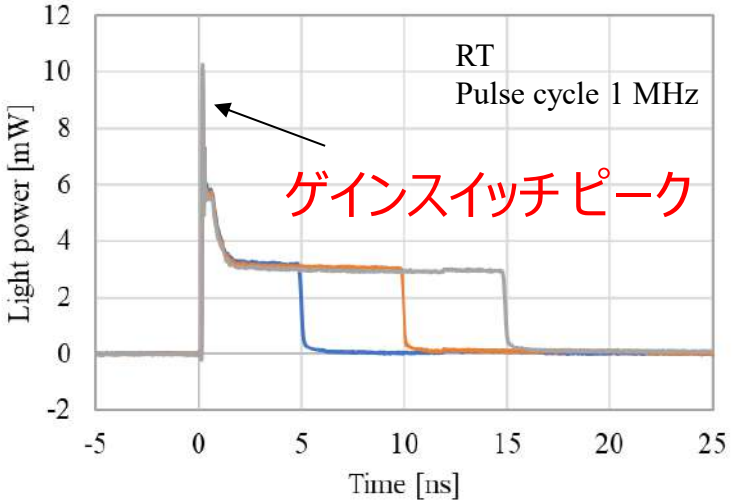
VCSEL Aでは、電流パルスの立上りに同期して、緩和振動に起因するゲインスイッチ短パルスが観測された。

パルス応答

RICOH
imagine. change.

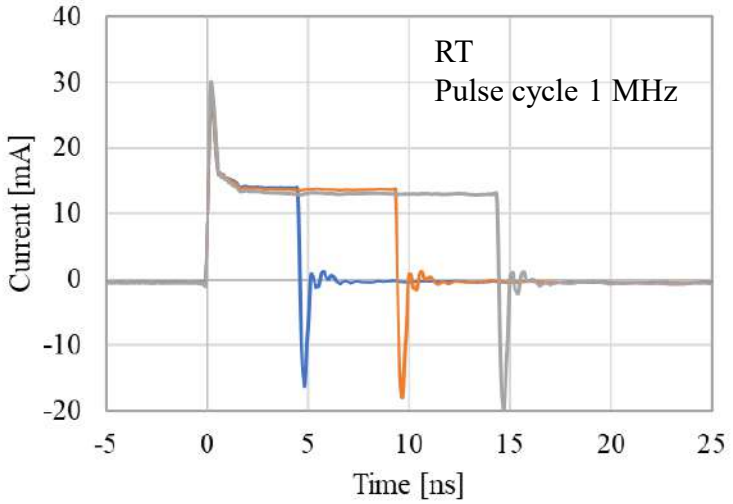
VCSEL A with large Γ

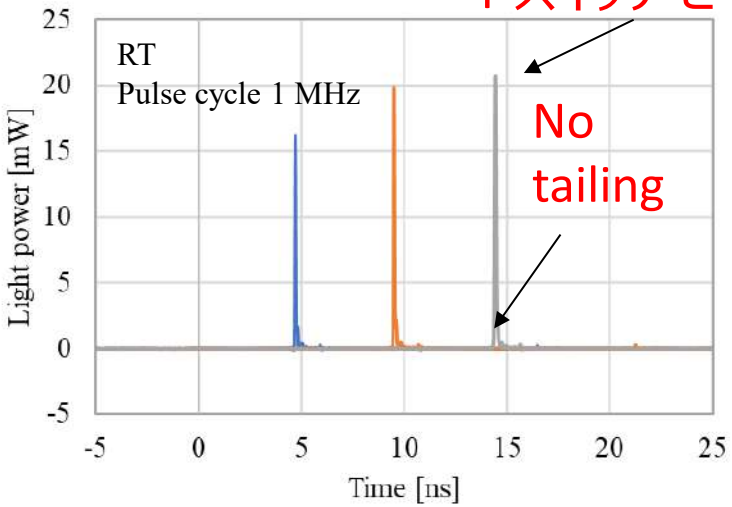




VCSEL Aでは、電流パルスの立上りに同期して、緩和振動に起因するゲインスイッチ短パルスが観測された。

VCSEL B with small Γ



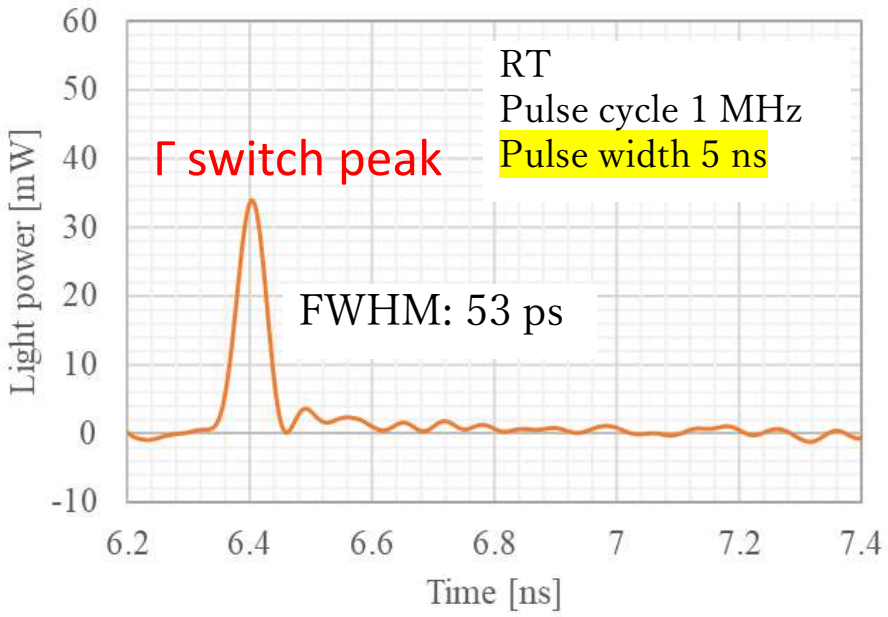


一方、VCSEL Bでは、電流パルス立上り時のゲインスイッチ動作は観測されなかった。また、電流パルス立下り時にテーリングのない短パルスが観測され、提案するΓ-switch動作が確認された。

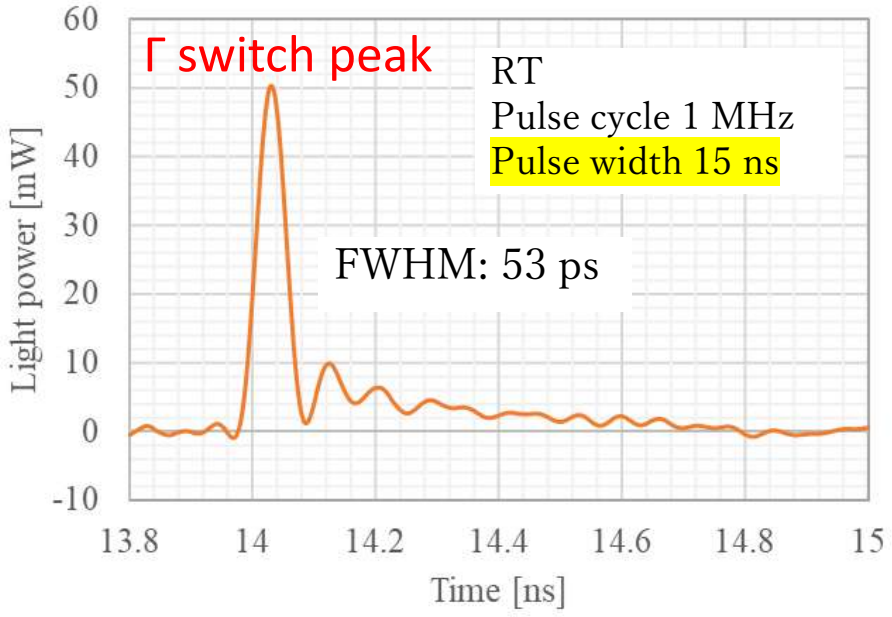
パルス幅およびピーク出力（VCSEL B）

RICOH
imagine. change.

シングルスキャンモード



シングルスキャンモード

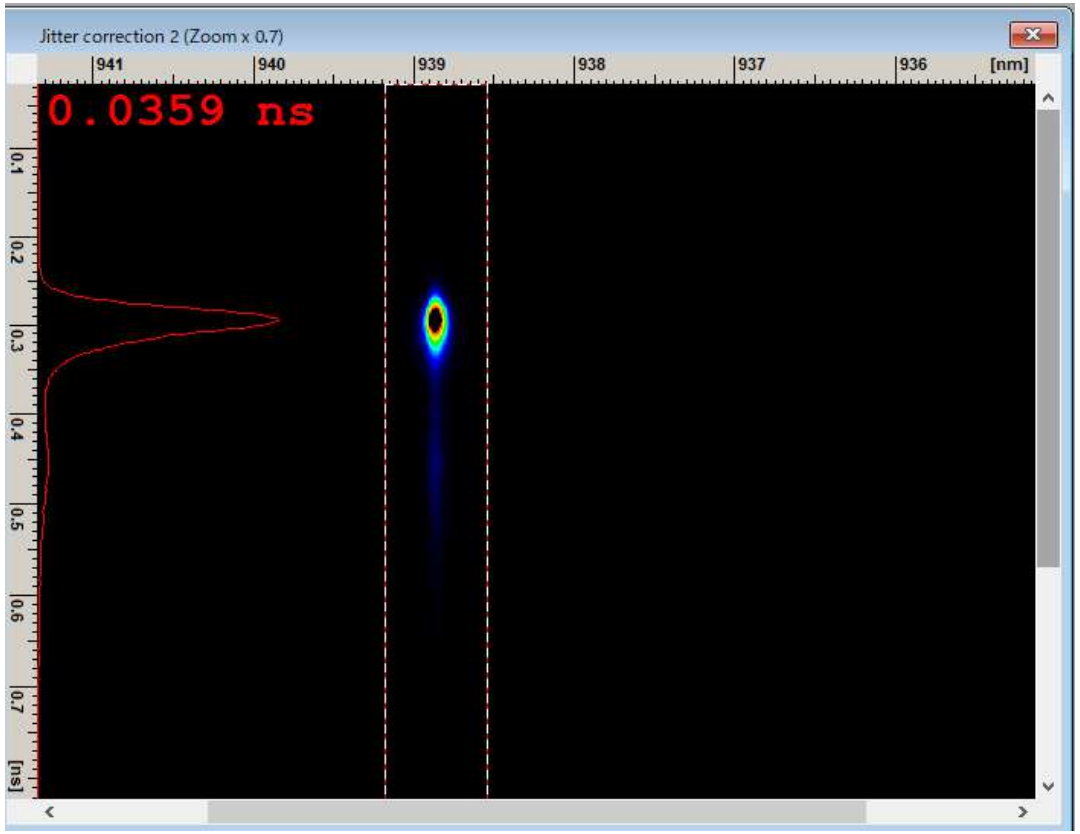


Γ-switch動作により、いずれのパルス条件においても53 ps（FWHM）の狭パルスが得られた。
15 ns電流パルス駆動時におけるピーク出力は50 mWであった。

得られたパルス幅は測定系の時間分解能に近く、実際のパルス幅は53 psよりも短い可能性がある。

ストリークカメラによるパルス幅測定

RICOH
imagine. change.



ストリークカメラを用いてパルス幅を測定

測定されたパルス幅は 45 ps であった。さらに、測定系のジッタ成分を補正した結果、36ps のパルス幅が得られた。

他の方式との特徴比較

RICOH
imagine. change.

方法	光パルス幅	駆動電流パルス幅	特徴、課題
Q スイッチ	40～200ps	サブns秒～数ns	SAが必要（設計が複雑、吸収損失が発生）
ゲインスイッチ	5～30ps	数10ps～数100ps	高速ドライバが必要
Γ スイッチ	**30～50ps**	**数ns**	**SA不要、裾引きなし、高速ドライバ不要**

出力はいずれも100mW程度

SA: 可飽和吸収体

Γスイッチは、SA不要・数ns駆動でありながら、裾引きのない数10psの光パルスを実現する新たな短パルス発振方式である

まとめ

RICOH
imagine. change.

・キャリアプラズマ効果を利用して横モード分布を制御することにより、数十 psの短パルスを発生させる新たな手法（Γ-switch）を選択酸化型VCSELにおいて実証した。

・薄い酸化膜構造と注入キャリアによって利得領域と横モードとの重なりが減少し、電流注入中の誘導放出を抑制できることを示した。

・電流停止後、横モード分布が元の状態へ回復することで、電流パルス立下りに同期した短パルス発振が得られた。

・酸化開口面積29 μm^2の薄膜酸化構造を有する940 nm上面発光VCSELにおいて、15 ns電流パルスの立下りに同期して、パルス幅53 ps、ピーク出力50 mWを室温下で実現した。

・さらに、ストリークカメラ測定では、測定系ジッタ補正後のパルス幅として36 psを確認した。

・本手法で得られるテーリングのないピコ秒パルス光源は、d-TOF（アイセーフティ・測距精度向上）、高速蛍光分光、非熱加工用シード光源、その他の短パルス応用に有望である

RICOH
imagine. change.

ご清聴ありがとうございました