

**報道解禁日時 日本時間 10月20日(火) 0時****世界最高速の帯域 100GHz を超える直接変調レーザを開発**  
～SiC 基板上メンブレンレーザにより低消費電力で実現～

日本電信電話株式会社(本社:東京都千代田区、代表取締役社長:澤田 純、以下「NTT」)は、国立大学法人 東京工業大学(東京都目黒区、学長:益 一哉、以下 東工大)科学技術創成研究院 未来産業技術研究所の小山二三夫教授と共同で、高熱伝導率を持つ SiC 基板※1 上にインジウムリン系化合物半導体※2 を用いたメンブレンレーザ※3 を開発しました。直接変調レーザとして世界で初めて 3dB 帯域※4 が 100GHz を超え、毎秒 256 ギガビット(2560 億ビット)の信号を 2 km 伝送できることを確認しました。

直接変調レーザは、現在、データセンタ※5 で広く使用されていますが変調速度に限界があり課題とされてきました。本成果を用いれば、今後予想されるトラフィックの増大に低コスト・低消費電力に対応でき、また本技術の研究開発を進展させることで、NTT が提唱する IOWN(\*)構想を支える大容量光伝送基盤の実現に貢献していきます。

本成果は、英国時間 10 月 19 日に英国科学雑誌「Nature Photonics」のオンライン速報版で公開されます。

(\*)IOWN(アイオン:Innovative Optical and Wireless Network):

スマートな世界を実現する最先端の光関連技術および情報処理技術を活用した未来のコミュニケーション基盤。

## 1. 研究の背景

データトラフィックは今後も増加を続け、特にデータの集中するデータセンタではサーバ間を接続する光インターコネクション※6 の大容量化が必須です。一方で、データセンタの消費電力増加は避けなければならない、低消費電力化の要求も同時に満たすことが重要です。現在、データセンタでは、低消費電力・低コストという特長から直接変調レーザが最も多く使用されています。直接変調レーザは、レーザに注入した電流(キャリア※7)に比例して光(フォトン※8)出力が変化する強度変調を利用しているため、キャリアとフォトンの相互作用である緩和振動周波数※9 により、変調速度が制限されています。図 1 は過去 30 年にわたる直接変調レーザの 3dB 帯域の変遷を示しています。90 年代にレーザ活性層※10 の高性能化により 30 GHz 程度の 3dB 帯域が得られていますが、その後、大きな進展は得られていませんでした。

活性層の高性能化によるこれ以上の改善は困難と考えられるために、付加的な高速化手法としてフォトン-フォトン共鳴が注目され、検討が行われています。これはレーザの発振モード※11 に隣接

する縦モード※12 との離調(ディチューニング)を強度変調時に発生する側帯波※13 の周波数に一致させることにより、その特定の変調周波数付近での強度変調を増強させるというものです。図2はフォトン-フォトン共鳴を適用した場合の 3dB 帯域の変遷を示しています。これまでの検討で 3dB 帯域 55GHz が達成されており、毎秒 112 ギガビットの PAM4 信号※14 の生成が実現されています。さらなる高速化に向けてフォトン-フォトン共鳴の周波数を大きくすることはディチューニングの調整で可能と考えられますが、信号を生成するためには低周波領域から高周波領域にわたる周波数応答特性が平坦であることが必要です。そのためには緩和振動周波数を大きくし、フォトン-フォトン共鳴周波数の間で大きな落ち込みが生じないようにすることが重要な課題でした。

## 2. 研究の成果

これまで NTT では、緩和振動周波数を増大するために活性層の光閉じ込め係数に注目し、熱酸化膜(SiO<sub>2</sub>)付きシリコン(Si)基板上にメンブレンレーザの開発を行ってきました。メンブレンレーザは活性層の光閉じ込め係数が大きく小型という特長から、低消費電力な直接変調レーザが実現できます。一方で、熱伝導率の小さな SiO<sub>2</sub> 上に素子を作製していることから電流注入に伴う活性層の温度上昇が大きいと、電流量を増やしても活性層の利得の飽和により緩和振動周波数は 20GHz 程度で飽和していました。

今回、活性層での発熱を抑えることを目的に SiO<sub>2</sub> の約 500 倍の高い熱伝導率をもつ炭化ケイ素(SiC)基板上にインジウム燐(InP)系メンブレンレーザを作製しました(図3)。SiC は InP と比較して屈折率も小さいことから、光閉じ込め係数も SiO<sub>2</sub> 上の素子とほぼ同等です。素子作製は、極薄膜(40 ナノメートル)の SiO<sub>2</sub> を間に挟んで直接接合を用いました。100mW の発熱源を仮定した計算では、活性層長 50 ミクロンのメンブレンレーザの活性層の温度上昇は、SiO<sub>2</sub> 膜厚が 2 ミクロンから 40 ナノメートルになった場合、130.9 度から 16.8 度に大幅に削減されることがわかりました(図4)。実際に作製した素子では、緩和振動数が最大値となる電流値は SiO<sub>2</sub> 上の素子では 5.5 mA でしたが、今回の作製した素子では 30 mA まで大きくすることができ、世界最高の緩和振動周波数 42 GHz と 3dB 帯域 60 GHz が得られました(図5)。

さらに、出力導波路端面からの光フィードバックを用いて、フォトン-フォトン共鳴が 95GHz 付近で起こるような素子を設計しました。その結果、3dB 帯域 108GHz を得るとともに(図6)、毎秒 256 ギガビット(2560 億ビット)の PAM4 信号の生成、および 2 km 伝送に成功しました(図7)。

## 3. 今後の展開

伝送容量が 1 テラビットを超えるような次世代イーサネットの規格に 4 つあるいは 8 つのアレイで対応可能な送信機の実現などが期待されます。低消費電力化が同時に実現できることにより、今後懸念されるデータ量の増加によるデータセンターやスーパーコンピュータの消費電力の増加を削減することも期待されます。将来的には NTT が提唱する IOWN 構想に向け、光を中心とした革新的技術を活用し、これまでのインフラの限界を超えた高速大容量通信の実現をめざします。

## 4. 技術のポイント

### (1) SiC 基板上メンブレンレーザ

メンブレンレーザは、図3に示すように、低屈折率材料上に作製した 300 nm 程度の膜厚(従来型の

レーザの 1/10 程度)のレーザのこと。InP 層のなかにレーザ活性層が埋め込まれており、基板に水平方向に pn 接合を形成した横注入型ダイオード構造になっています。メンブレンレーザは活性層のすぐ近傍に屈折率の小さな物質があるために活性層で発生した光(フォトン)は活性層内に強く閉じ込められます。注入されたキャリアも活性層に強く閉じ込められるために誘導放出が効率的に発生します。これにより、直接変調レーザの低消費電力化や高速変調化が期待できます。図 8 は SiO<sub>2</sub> 上と SiC 上のメンブレンレーザの光閉じ込めの様子を示していますが、図に示すように両者にほとんど差がなく SiC は SiO<sub>2</sub>と比較して約 500 倍の熱伝導率を持ち、さらに光閉じ込めも同程度という特長を持ちます。

## (2) 作製技術

酸素プラズマを用いて SiC と InP を SiO<sub>2</sub> を介して直接接合しています。SiO<sub>2</sub> はプロセスに耐えうる接合強度を得つつ活性層へのダメージがない接合を可能にしますが、熱伝導率が小さなため極力薄くすることが重要です。今回、接合後の昇温時のガスの発生による膜の剥離等を抑えるため発生したガスを逃がすための溝をあらかじめ基板に形成する工夫で良好な接合を得ることに成功しました。

図 9 に作製プロセスを示します。まず、直接接合後に InP 基板を除去します(図 9(a))。次にレーザのコア領域となる部分の活性層を残して、それ以外のところでは活性層を下部の InP 層までエッチングにより取り除きます(図 9(b))。エッチングの際に保護膜となる SiO<sub>2</sub> 層をマスクとして、InP 層が表面に出ているところに選択的に InP を再成長します。これにより、活性層が InP 層に埋め込まれます(図 9(c))。その後、選択的にドーピング領域を作製し、グレーティング、電極を形成して素子を作製します。

## (3) キャビティ内フォトン寿命の設計

緩和振動周波数が大きくなってきた場合に、直接変調レーザの周波数応答は、キャビティ内にフォトンが平均的に閉じ込められる時間であるフォトン寿命や、活性層のゲインの非線形飽和などで制限されてきます。ゲインの非線形飽和係数は活性層に用いる材料などにより決まるため、設計の余地は少ないのですが、フォトン寿命はレーザ共振器の設計により制御可能です。図 10 はキャビティ内のフォトン寿命を変化させた場合の周波数応答特性を計算により示したものとなります。計算では、緩和振動周波数は 40 GHz で一定としています。図に示されるように、フォトン寿命が 1 ピコ秒付近に設定することで 3dB 帯域を最大化できることがわかります。

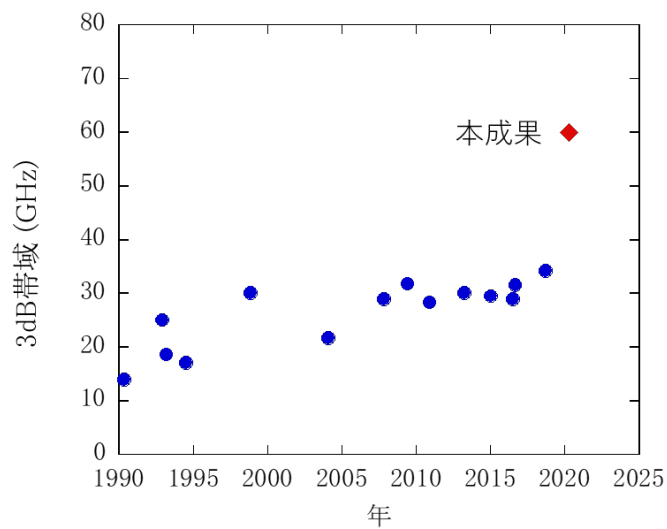


図1 直接変調レーザの 3dB 帯域の変遷(付加的な高速化手法の利用なし)

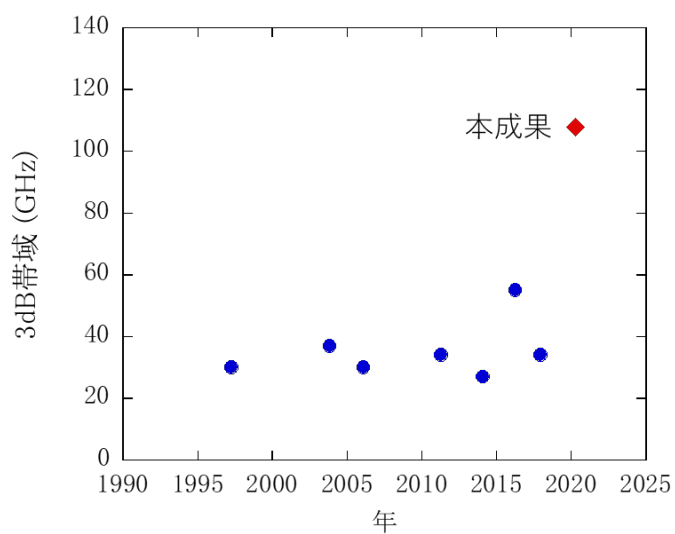


図2 フォトン-フォトン共鳴を用いて直接変調レーザの 3dB 帯域の変遷

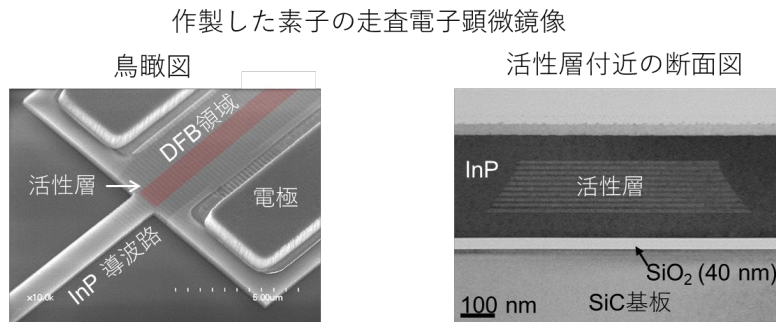
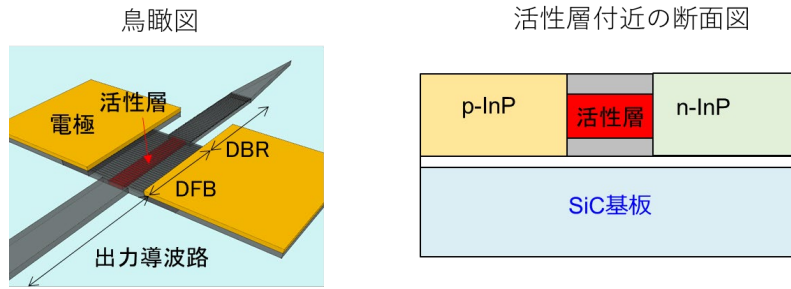


図3 作製した素子の外観図と走査電子顕微鏡像

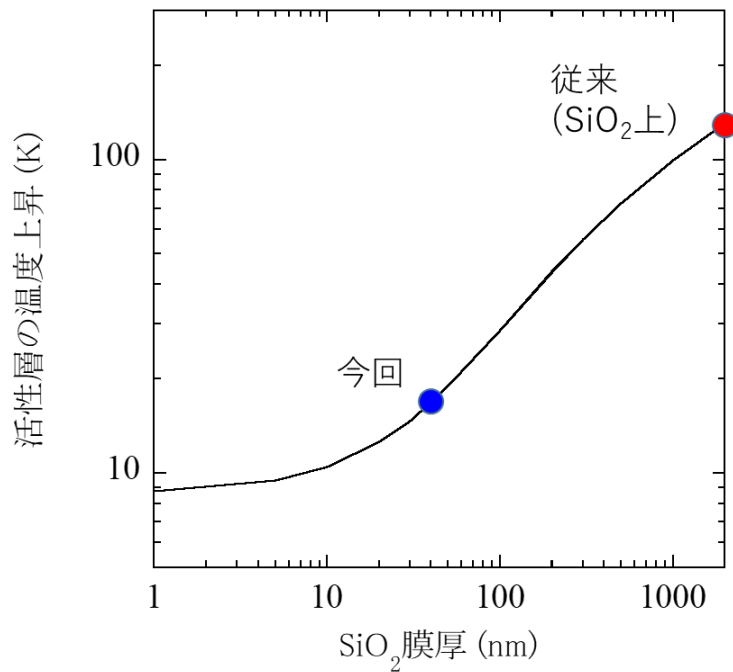


図4 50ミクロンの活性層長のレーザで100mWの熱源を仮定した場合の活性層の温度上昇

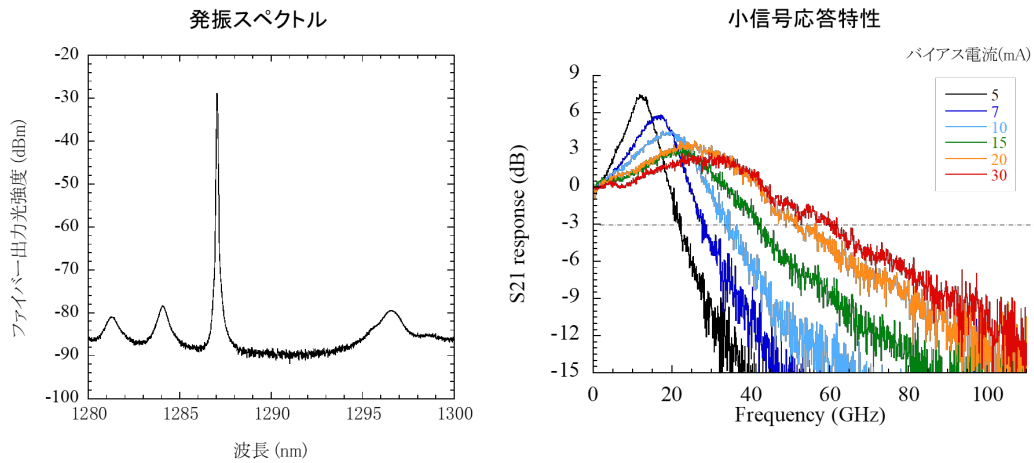


図5 作製した素子の特性(端面からの反射のない素子)

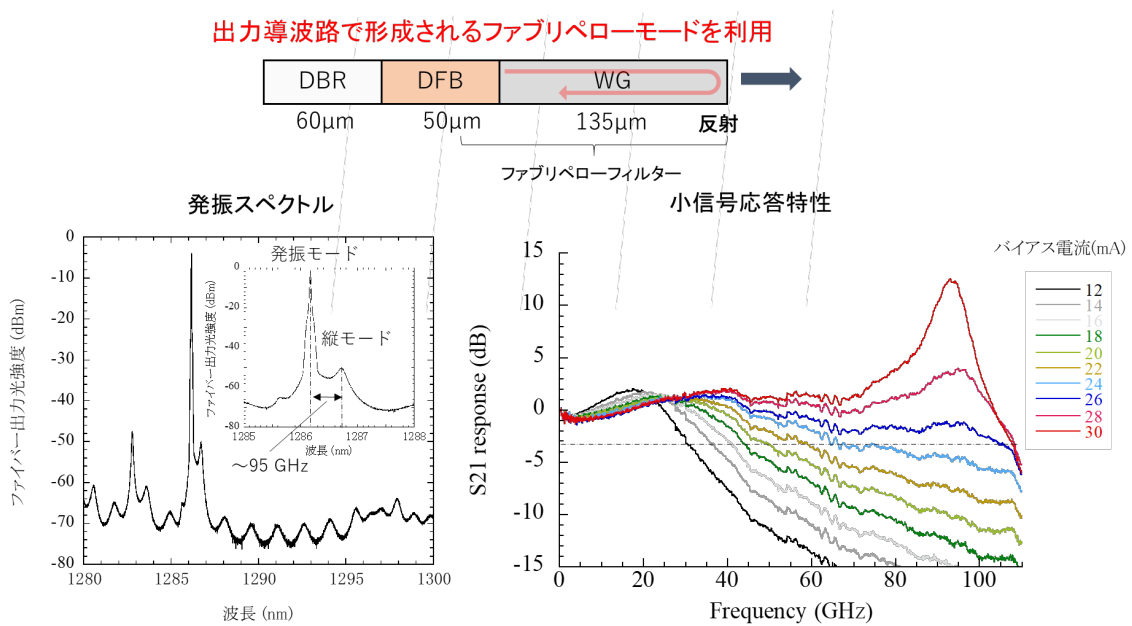


図6 フォトン-フォトン共鳴を用いた素子の特性



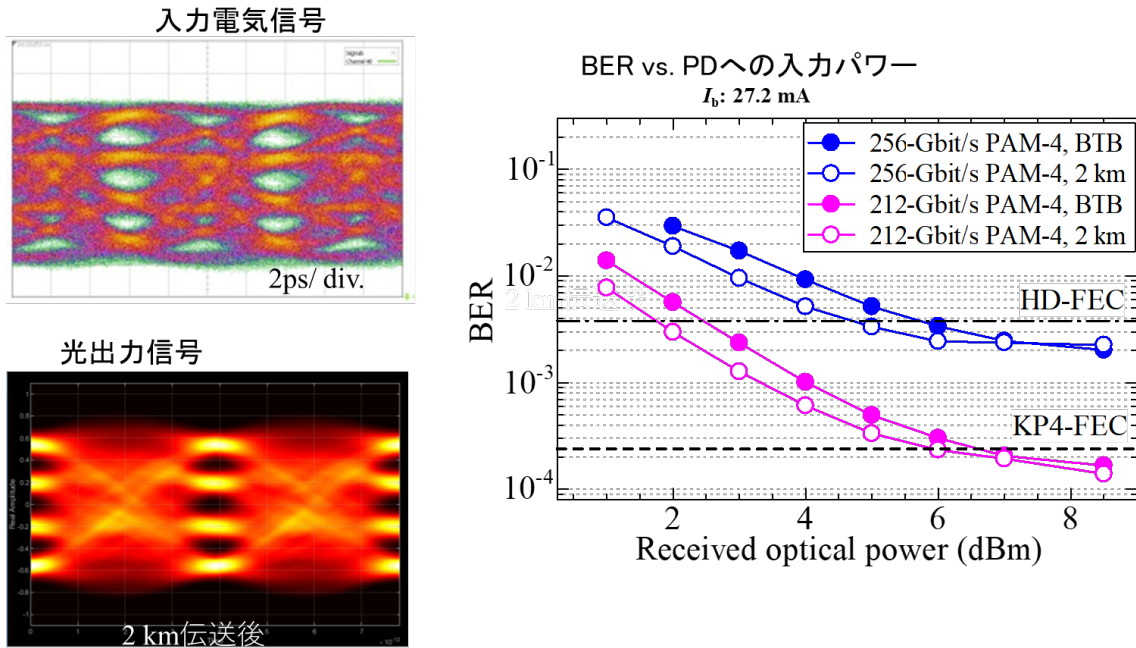


図7 256 Gbit/s PAM-4 の生成と 2 km 伝送

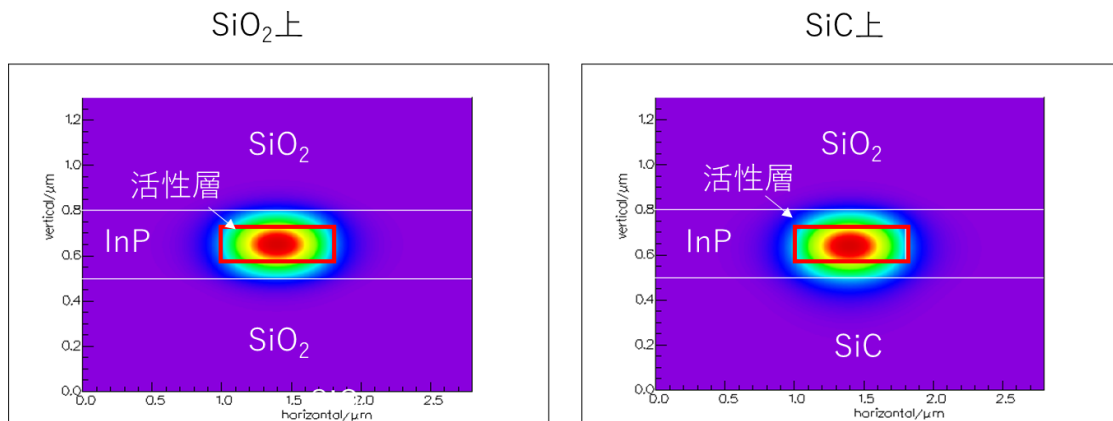
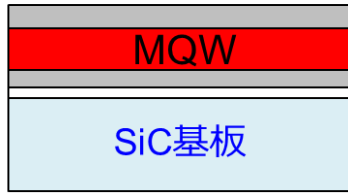
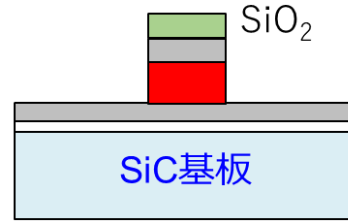


図8 SiO<sub>2</sub> 上、SiC 上のメンブレンレーザの光のモード分布

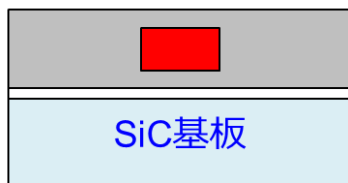
a. InP/SiC接合後



b. コア層形成



c. 埋め込み再成長



d. ドーピング領域形成

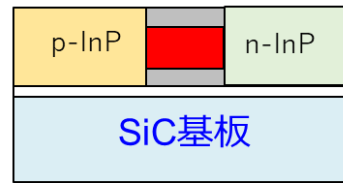


図9 プロセス工程図

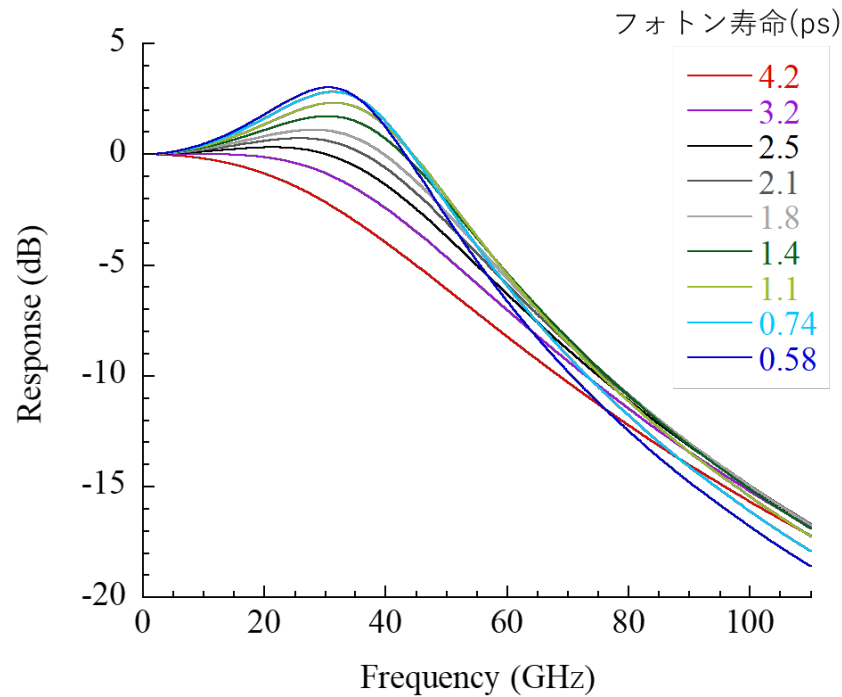


図10 緩和振動周波数を40GHzと仮定した場合の計算による周波数応答特性のキャビティ内光子寿命依存性



## 【用語解説】

### ※1 SiC 基板

ケイ素(Si)と炭素(C)からなるIV族の化合物半導体。熱伝導率  $490\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、屈折率 2.58。パワー半導体として広く用いられているほか、熱伝導率が大きいことからレーザーなどの発熱を効率よく逃がすための基板として用いられます。

### ※2 インジウムリン系化合物半導体

インジウムとリンを含むIII-V族の化合物半導体。Ga(ガリウム)、Al(アルミニウム)、As(ヒ素)などを適量混ぜることでレーザー、変調器、受光素子などの動作波長を調整できます。また高速な電子回路の作製にも用いられます。

### ※3 メンブレンレーザー

空気などの低屈折率な媒質に囲まれた薄膜構造のレーザー。

### ※4 3dB 帯域

素子の応答特性を示す指標。素子を低周波から高周波へ変調した場合に、変調振幅が低周波側の時と比較して3dB(半分に)小さくなる周波数のこと。

### ※5 データセンタ

インターネット上のデータを保存するサーバ、サーバ間を通信するためなど機器を集めた施設。インターネットの進展とともに巨大なデータセンタが必要となっており、データセンタの消費する電力が課題となっています。

### ※6 光インターコネクション

電気信号を光信号に変換して機器間を接続する方式。電気信号を光信号に変換する際に半導体レーザーが用いられます。低損失・高帯域の光ファイバを用いることで電気での信号伝送よりも低消費電力に信号を送受信できます。

### ※7 キャリア

電流注入や光励起により生成された電子や正孔のこと。電子と正孔が再結合する際に光が放出されます。

### ※8 フォトン

電子と正孔が再結合する際に放出される光の粒子。

### ※9 緩和振動周波数

パルス状の電流をレーザーに注入した場合に、レーザー共振器内のキャリアは急激に増加するため大量のフォトンが発生しレーザー発振します。レーザー発振によりキャリアはフォトンになり、結果としてキャリアは減少します。キャリアが減少するとフォトンが減少するため光出力の時間的変動が起こりま

す。この振動の周波数を緩和振動周波数と呼びレーザーの直接変調の速度を制限する大きな要因となります。

※10 レーザ活性層

キャリアが注入されフォトンが生成される領域のことです。インジウムリン系化合物半導体では、Ga、Al、Asなどの含有量を調整してレーザーの発振波長を得ています。

※11 発振モード

下記、縦モードの中でレーザー発振している縦モードのことです。一つの縦モードのみで選択的に発振しているレーザーはシングルモードレーザーと呼びます。

※12 縦モード

レーザー発振を得るためには、光の波としての性質から、共振器内を一周してきた光の位相(波)が初期値と一致することが必要です。この一致する波長を縦モードと呼びます。

※13 側帯波

レーザー光をある周波数で強度変調した場合に、発振スペクトルは広がります。この時、低周波側と高周波側に変調周波数に一致する周波数差に現れるピークが生成され、これを側帯波と呼びます。

※14 PAM (Pulse Amplitude Modulation) 4 信号

4値パルス振幅変調:2ビットのデータ(00、01、10、11)を4つのアナログレベルのパルス信号として伝送する強度変調方式です。1ビットのデータ(0、1)を2つのアナログレベルのパルス信号として伝送するNRZ(非ゼロ復帰)符号と比較して、一度に2倍の情報を送ることができます

■ 本件に関する報道機関からのお問い合わせ先

日本電信電話株式会社

先端技術総合研究所 広報担当

science\_coretech-pr-ml@hco.ntt.co.jp



TEL 046-240-5157

東京工業大学  
科学技術創成研究院 未来産業技術研究所  
教授 小山二三夫

[koyama@pi.titech.ac.jp](mailto:koyama@pi.titech.ac.jp)

TEL 045-924-5068

東京工業大学  
総務部 広報課  
[media@jim.titech.ac.jp](mailto:media@jim.titech.ac.jp)

TEL 03-5734-2975