

デジタルモックアップ実現に向けた 光電子融合設計技術

NTT先端集積デバイス研究所では、光電子融合集積回路の全体設計を可能とすることで、コンピュータ上で動作や精度、整合性の検証を行い、試作回数や設計時間を削減するデジタルモックアップを光モジュールでも実現することを目指します。本稿では異なる設計プラットフォームを必要としていた光回路と電子回路の設計を、1つの統合プラットフォームで行う光電子融合設計技術を紹介します。

のさか ひでゆき ほんだ けんたろう

野坂 秀之 / 本田 健太郎

たけだ こうたろう ふくだ ひろし

武田 浩太郎 / 福田 浩

やまもと つよし

山本 剛

NTT先端集積デバイス研究所

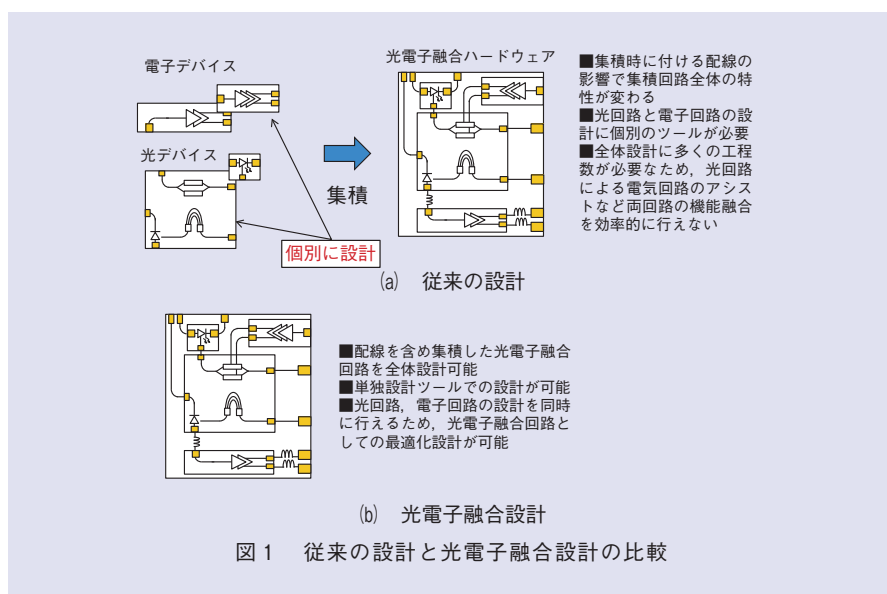
光電子融合ハードウェア設計の課題

年間30%を超えるネットワーク情報通信量の爆発的増加を背景に、光通信デバイスの継続的な高速、小型化は通信業界において常に着目される課題です。この課題にこたえる光通信デバイスの革新的技術の1つに光電子融合ハードウェア技術があります。光電子融合ハードウェア技術とは通信用デバイスに用いる光デバイスと電子デバイスを機能的に融合し、単独デバイスでは成し得なかった高性能、高機能、小型化を達成する技術です。今までのハードウェアでも光デバイスと電子デバイスを組み合わせることはありましたが、これらは個別の機能の足し合わせでした。光電子融合ハードウェアは光デバイスと電子デバイスが融合して1つのデバイスを形成し、機能の足し合わせでは達成し得なかった性能を実現します。前者は極端に言えば光デバイスと電子デバイスが配線でつながっていても良いのですが、後者は複数の光回路と電子回路が1つのプラットフォーム上に集まり、機能面で連携制御されて動くため、集積回路でなければ実現できません。その結果として光デバイスだけ、あるいは電子

デバイスだけではできない高性能をもたらします。NTT先端集積デバイス研究所では光通信デバイスの高速小型化を目指し、さまざまな光電子融合ハードウェアに関する研究を行っています。本稿ではこの光電子融合ハードウェアの設計技術について紹介します。

光電子融合ハードウェアの高集積化、機能の複雑化が進むにつれて、その設計技術において新たな課題がみえてきています。一般に光電子融合ハードウェアは図1(a)のように光デバイスと電子デバイスの設計工程が分かれ

ており、両デバイスは目標の全体性能を達成するため互いに連携するように機能分担を決定し、個別に設計されます。その後集積されますが、この際に両デバイスの連携に伴う相互作用や付加される配線の影響で、集積されたハードウェアは個別の性能の足し合わせとは異なった性能を示します。すなわち光電子融合ハードウェアの設計では、光・電子両デバイスが個別に最大性能を示すように設計するのではなく、集積後の全体性能をみながら、最大化するように光・電子両デバイスを最適化設計する必要があります。



しかし光デバイスと電子デバイスは各々専用設計ツールを必要とし、集積後の性能をみるためには各々の設計ツールで出力データを受け渡した後に再計算する必要があるため、何度も最適化を繰り返す全体設計では設計工数が膨大になってしまいます。加えて両設計ツールからは時間軸上の信号波形や各デバイスの周波数特性といった限定された特性のみが出力されるため、一部の特性だけをみて光デバイスと電子デバイス間での設計最適化を行わなければならない、時間的コストが増加するという課題があります。また複数の設計ツールライセンスを必要とするため、ライセンス費用もかさみます。すなわち現状の光電子融合ハードウェアの設計は時間的、経済的に非常にコストがかかる点が問題です。

光電子融合設計技術

■デジタルモックアップ化

NTT先端集積デバイス研究所では前述の問題を解決するために光電子融合設計を提案しています。光電子融合設計は図1(b)のように配線を含め集積された光電子融合ハードウェアを1つのプラットフォームで設計する技術で、データ受渡しによる設計ステップの増加を省きます。また、光・電子両デバイスを同一環境で設計可能とすることで設計ツールライセンスの増加を抑え、複雑に機能融合した光・電子両デバイスの最適化設計を効率的に行うことができます。すなわち今までは膨大なコストをかけなければ設計できなかった光電子融合ハードウェアにおいて、試作回数や設計時間を削減することが可能となります。これは実際にモノをつくることなく、コンピュータ上で効率良く動作や精度、整合性の検証が可能で、デジタルモックアップと呼

ばれる技術の一種です。私たちは本技術を発展させることで究極的には光電子融合ハードウェアの試作をゼロにする完全なるデジタルモックアップ化を目指しています。

本稿ではデジタルモックアップの実現に向けたマイルストーンとして電子回路シミュレータをベースにした光電子融合設計環境を紹介します⁽¹⁾。電子回路シミュレータをベースにした設計技術は、LSI設計環境との整合性が高いことが特長の1つです。システム全体で電子回路と光回路を比較した場合、前者は素子数が圧倒的に多いため、電子回路シミュレータをベースにして光回路を取り込むことで、既存システムを有効活用できます。また電子回路シミュレータは設計環境として広く産業界に浸透しているため、導入障壁が低いというメリットもあります。電子回路設計の豊富で成熟した設計環境に光電子融合ハードウェアの設計環境を構築することで、デジタルモックアップ化を一気に加速しようとする試みです。

■等価回路化

電子回路シミュレータ上で光デバイスを扱うときには重要な点が2点あります。1つは電子デバイスの設計と同じ手順で光デバイスの設計が行えること、もう1つは光デバイス特有のパラメータも扱えるようにすることです。前者は光電子融合設計のコンセプトにかかわる点です。電子回路シミュレータ上では電子デバイスの設計は容易に可能ですが、光デバイスは全くサポートされていないので、新しい設計モデルを考える必要があります。後者は波長、偏波、モードなど光信号を扱うときに必須ですが、電子回路シミュレータ上では扱うことができないパラメータを指します。

本研究では光デバイスを、電子回路素子を用いて等価回路化することで、電子回路シミュレータ上に取り込みました。光デバイスの等価回路化はこれまでも数多く報告されていますが、特性のフィッティングが主目的での等価回路化だったため、等価回路を構成する電子回路素子と光デバイスは関係性が薄く、光デバイスを再設計すると等価回路を再度組み直す必要がありました。汎用性に富む等価回路をつくるためには、光デバイスの構造や物理パラメータと電子回路素子が1対1対応した回路である必要があります。構造や物理パラメータと等価回路の回路素子が対応していると、構造やプロセス変更などの再設計は回路素子のパラメータを変更するだけで、等価回路の組み直しが必要なくなります。ここでは図2のようにフォトダイオード*1を光デバイスの例にとって説明します。フォトダイオードは光信号を電気信号に変換するデバイスであり、電気信号が流れる電子回路部分と、光信号を扱う光回路部分に分けることができます。電子回路部分はコンタクト抵抗やパッド間容量、空乏層容量など、フォトダイオードの構造由来のパラメータに対応した電子回路素子によって構成されており、光回路部分では感度や光反射といった光信号で扱う物理パラメータを回路素子に置き換えて構成されています。等価回路の電子回路部分で電気特性を、光特性を、それぞれ記述し、全体としてフォトダイオードを示しています。この等価回路を用いることで、電子回路シミュレータ上での光デバイスの設計が可能になります。

■等価回路の設計変更

この等価回路を用いた設計変更の一

*1 フォトダイオード：光信号を電気信号に変換するデバイス。

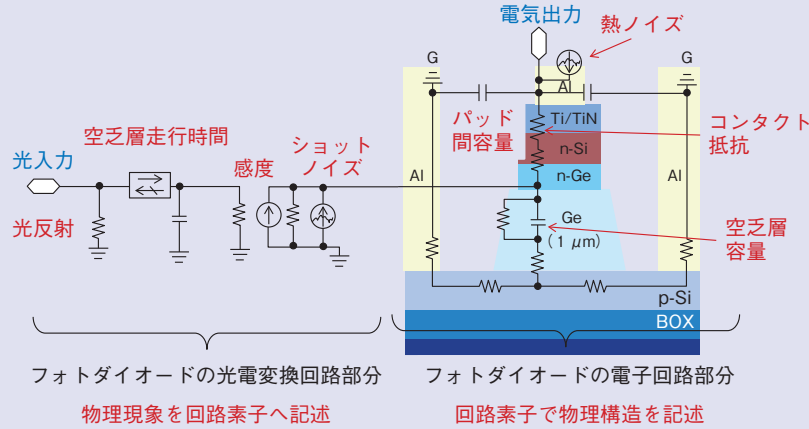
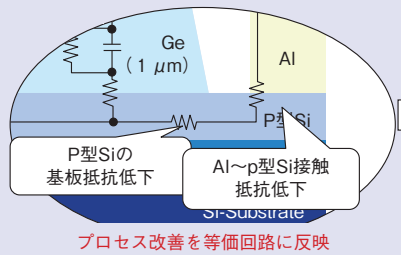
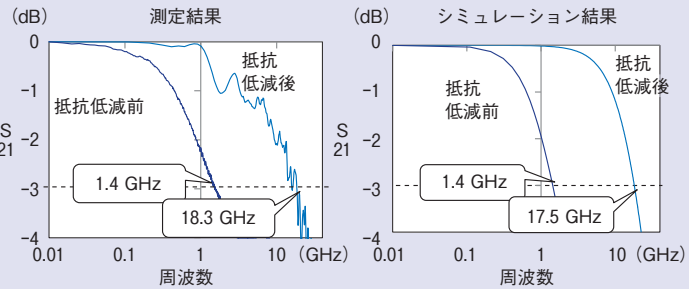


図2 構造と回路素子が1対1対応しているフォトダイオードの等価回路



(a) 抵抗低減の設計変更を等価回路に反映した例



(b) 測定結果とシミュレーション結果

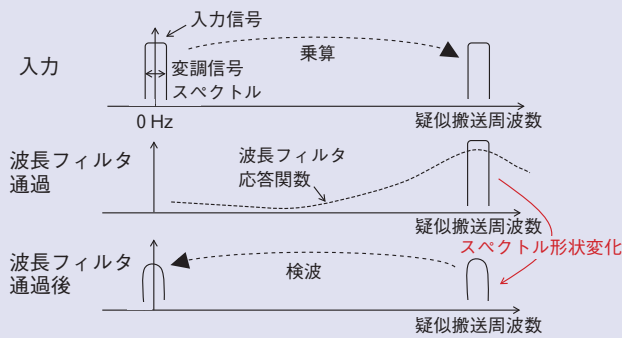
図3 フォトダイオードの等価回路を用いた設計変更の例

例を図3に示します。フォトダイオードを構成するp型Siの不純物濃度を変えることによって、2つの異なる抵抗を持つフォトダイオードを作製しました。抵抗を減少させることで高速特性の改善ができますが、等価回路では図3(a)のようにp型Si抵抗と接触抵抗に相当する抵抗素子のパラメータを変更するだけでこの設計変更を表現することができます。図3(b)は実際に設計変更したフォトダイオード特性の実測値と、等価回路を用いてシミュレーションした計算値です。両特性はよく一致し、本等価回路が光デバイスの設計変更に有効なことが分かります。

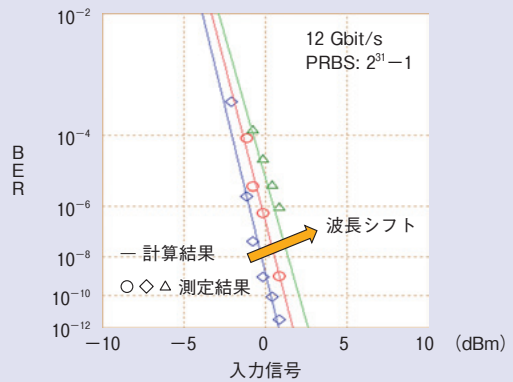
光デバイスを扱う際に特に重要とな

るパラメータの1つである波長の、電子回路シミュレータ上での表現方法を図4に示します。光信号における波長とは、搬送周波数のことであり、通信波帯では200 THz程度です。搬送周波数を伴った信号は電子回路シミュレータ上で計算可能ですが、100 THzを超える高い周波数を扱う計算は膨大なコンピュータリソースが必要となるため現実的ではありません。そこで本研究ではこの搬送周波数を疑似的に低い周波数に変換し、これを疑似搬送波として扱うことで、現実的なコンピュータリソースのもと、電子回路シミュレータ上での計算を可能としました。図4(a)は波長フィルタを例にして波長依

存特性の計算方法を示しています。入力された信号に対して実際の搬送周波数よりもはるかに低い疑似搬送周波数を乗算し、疑似的に搬送周波数を伴った信号をつくります。次に波長フィルタの中心周波数も疑似搬送周波数に変換します。最後に、疑似搬送周波数を中心に入力信号と波長フィルタ特性を掛け合わせるによって、入力信号の波長依存性を計算することができます。図4(b)はこの手法を用いて計算した波長フィルタ通過後のビットエラーレート(BER)の波長依存特性です。入力信号の疑似搬送周波数と波長フィルタの中心周波数が合致しているときのBERに比べ、疑似搬送周波



(a) 波長依存型特性の計算方法



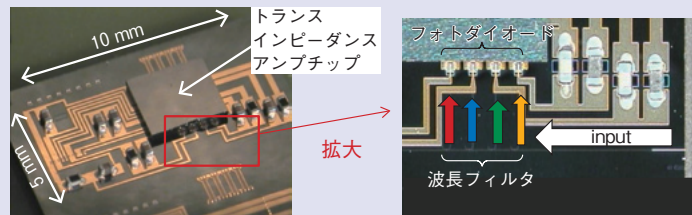
(b) BER測定結果と計算結果

図4 疑似搬送周波数を用いた波長の表現

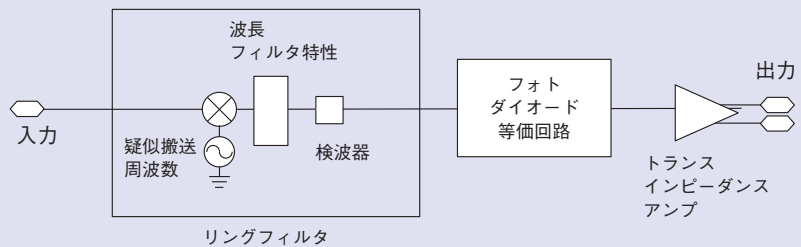
数と中心周波数がずれた場合は、入力信号が波長フィルタにカットされるのでBERが低パワー側にシフトしています。実際の測定でも同様のBERシフトが観察されます。計算結果と測定結果がよく合致していることから、計算が正確に波長依存特性を表現していることが分かります。すなわち電子回路シミュレータ上で今まで扱うことのできなかつた波長を、疑似搬送周波数を用いることで扱うことが可能になったといえます。

光電子融合ハードウェアの特性シミュレーション

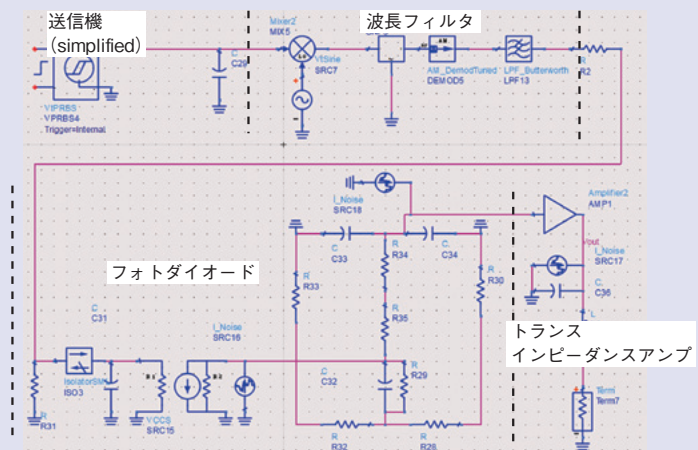
最後に本研究の光電子融合設計技術を用いた光電子融合ハードウェアの特性シミュレーションの結果を示します。光電子融合ハードウェアの例としてここでは光レシーバを挙げます。光レシーバは光ファイバ中を伝搬してきた音声や画像などの情報を送る光信号を電気信号に変換するハードウェアで、光ファイバ通信には必要不可欠なものです。実際に作製した光レシーバの外観を図5(a)に示します。図5(b)のブロック図が示すように、光レシーバは光デバイスである波長フィルタと



(a) 外観

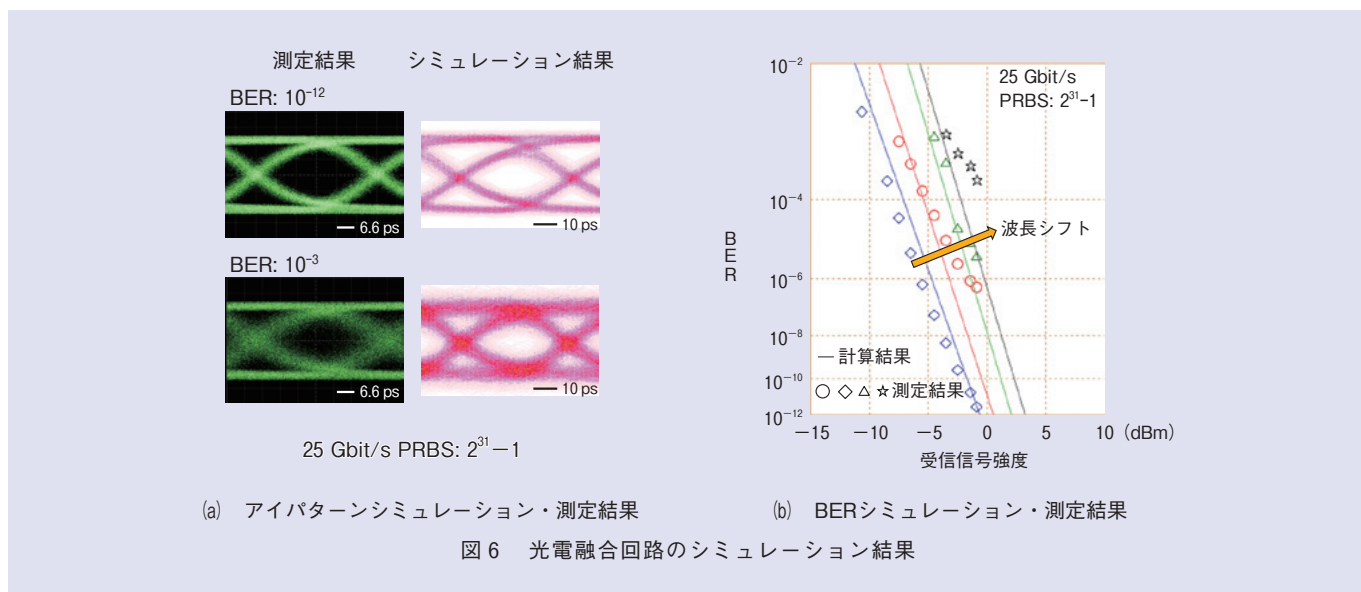


(b) ブロック図



(c) 等価回路

図5 光レシーバ



フォトダイオード、電子デバイスであるトランスインピーダンスアンプ*2で構成され、図5(a)に示すとおり両デバイスは高密度に集積されています。この光トランシーバの等価回路化が図5(c)です。実際の光レシーバを用いて測定したアイパターンとBER、および等価回路を用いて計算したアイパターンとBERを図6に示します。アイパターン、BERともに計算結果と測定結果で良い一致を見せ、本研究で作製した等価回路が、実際の光レシーバをよく再現していることが分かります。

本等価回路を用いれば、光・電子ともにデバイス構造や物理定数などを設計パラメータとして扱うことが可能であり、電子回路シミュレータ上で光電子融合ハードウェアの特性を計算し、設計することが可能です。本設計技術は、電子回路シミュレータを、光電子融合ハードウェアの設計が同一設計ツール上で可能な、光電子回路シミュレータに生まれ変わらせる技術である

といえます。

今後の展開

本稿ではデジタルモックアップを目指した光電子融合設計技術について述べました。今後はさらに光デバイスの等価回路を増やし、より多くの光電子融合ハードウェアを設計可能なプラットフォームとしての拡張を目指します。

参考文献

- (1) K. Takeda, K. Honda, T. Takeya, K. Okazaki, T. Hiraki, T. Tsuchizawa, H. Nishi, R. Kou, H. Fukuda, M. Usui, H. Nosaka, T. Yamamoto, and K. Yamada: "Comprehensive photonics-electronics convergent simulation and its application to high-speed electronic circuit integration on a Si/Ge photonic chip," Proc. of SPIE, Vol.9388, pp.938806-938812, Feb. 2015.



(左から) 野坂 秀之/ 本田 健太郎/
武田 浩太郎/ 福田 浩/
山本 剛

光電子融合ハードウェアが重要になるに従い、その設計技術の重要性も増えています。NTT先端集積デバイス研究所では統一プラットフォームで、低コスト、ユーザフレンドリーな設計技術を確立することを目指しています。

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所
光電子融合研究部
TEL 046-240-3139
FAX 046-240-2017
E-mail sende-kensui@lab.ntt.co.jp

*2 トランスインピーダンスアンプ：電流信号を電圧信号へ変換し、同時に信号を増幅する電子回路。