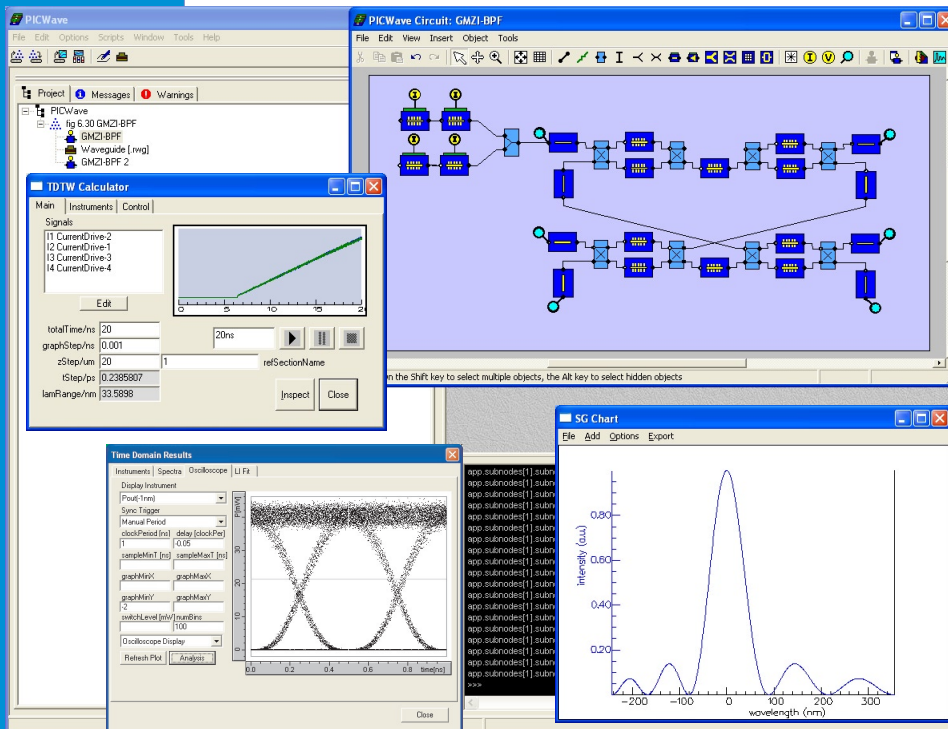


PICWave

a photonic circuit and laser diode/SOA simulator

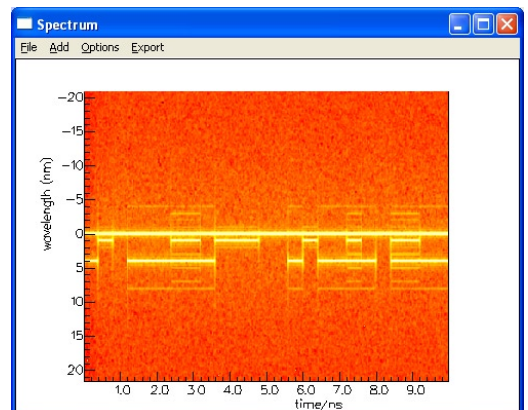
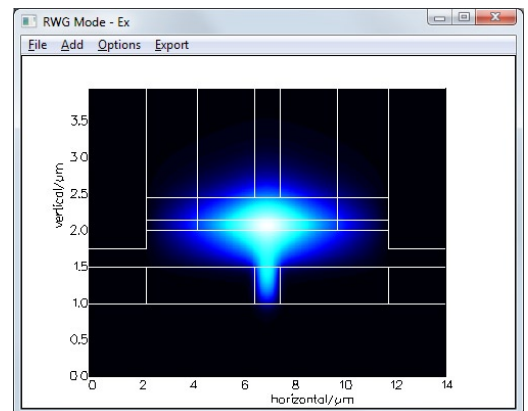


- ☑ 受動(パッシブ)および能動(アクティブ)両方の光集積回路(PIC)シミュレーションに対応した統合ツール
- ☑ レーザダイオードおよびSOAの高度で包括的な物理モデル
- ☑ 外部の厳密なマクスウェル電磁界ソルバーとの連携・統合に対応
- ☑ 各種ファウンドリのデザインキット(PDK)をサポート
- ☑ 多彩なファイバ・ブラッグ・グレーティング・モデル

- ☑ 波長可変レーザダイオードモデル
- ☑ 進行波型半導体光増幅器(TW-SOA)
- ☑ 大型リング共振器
- ☑ マツハツェンダー変調器(MZM)
- ☑ 電界吸収変調器(EA変調器)

最高速クラスの能動光集積回路(PIC)シミュレーションスピードを実現したソフトウェア

- ☑ 高速時間領域エンジン(Time domain)
- ☑ 物理的な2次元(XY)導波路モデル
- ☑ 直感的なドラッグ & ドロップ式回路作成ツール
- ☑ 高度なノイズモデル
- ☑ 静的・時間依存スペクトル



What is PICWave?

PICWaveは、レーザダイオードおよびSOA(半導体光増幅器)の高度な物理モデルを搭載した、光集積回路(PIC)シミュレータです。

波長可変レーザや変調器などの光電子デバイスの開発、および大規模な回路内で示す相互作用の評価に最適です。直径2mmのリング共振器をモデル化し、光周波数において数MHzという非常に高い分解能でのシミュレーションをきわめて短時間で実現します。

Calculation method

PICWaveの計算エンジンは、強力かつ柔軟な時間領域進行波(TDTW)モデルに基づいており、多角的な解析結果が、近似に頼らずに高精度かつ一貫性を持って導き出されます。

Requirements

OS: Windows 11 (64ビット版) プロセッサ: Intel x64
または AMD x64、2コア以上メモリ(RAM): 最小 8GB

Structure

PICWaveの回路は、導波路、Y分岐、方向性結合器、ミラーなどの受動(パッシブ)素子、SOAや電界吸収型変調器(EAM)などの能動(アクティブ)コンポーネントを数に制限なく自由に組み合わせて構成できます。これらを駆動するためのLRC電気回路の接続も可能です。

PICWaveのアクティブデバイス(能動素子)モデルは、常に最新かつ高度な機能を備えたモデルを提供します。

Design Integration

PICWaveは、量子井戸モデリング用の他モデルや、受動素子の詳細な解析を行う電磁界(EM)シミュレータとも緊密に連携しています。さらに、デザインキット(PDK)システムを利用することで、作成した設計データを対応するファウンドリ(半導体製造工場)へスムーズに出力することができます。

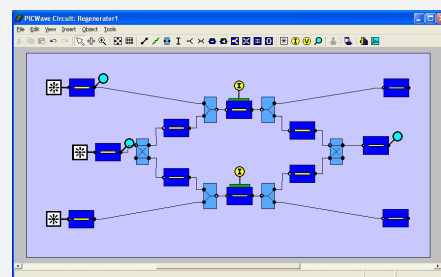
Circuit modelling, design kits and PDKs

☑ 能動PICの設計例: 2R光再生中継器(オプティカル・リジェネレータ)

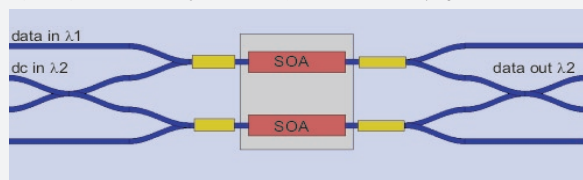
PICWaveの大きな強みの一つは、受動(パッシブ)コンポーネントと能動(アクティブ)コンポーネントを融合させる能力にあります。右図の光再生中継器は、総延長10,000 μm (10mm)を超える導波路で構成された大規模な受動光回路と、2つのSOA(半導体光増幅器)によって構成されています。

左上のアームから波長 λ_1 の信号光を入射すると、SOA(半導体光増幅器)内で波長 λ_2 の連続波(DC)光との間で非線形干渉が発生します。その結果、信号が λ_2 の波長へと変換されると同時に、振幅と消光比(オン・オフ比)が改善され「再生(リジェネレート)」されます。

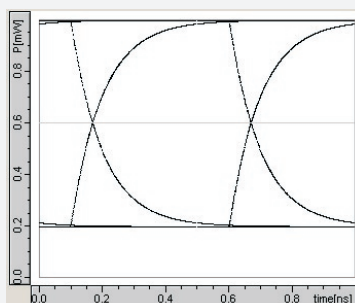
この光再生中継器のシミュレーションは、消光比(オン・オフ比)5:1、立ち上がり時間100nsのNRZ擬似ランダムビットパターンを入力信号としています。右下の図は、入力信号と出力信号の双方のアイパターン(アイダイアグラム)を示しています。再生後の信号では消光比が大幅に向上し、20倍の増幅が実現しています。一方で、SOA(半導体光増幅器)によって出力信号に顕著なノイズが重畳している様子も確認できます。PICWaveは、半導体デバイス内に存在するノイズ源の豊富なモデルを搭載しており、キャリア変動、位相雑音、相対強度雑音(RIN)なども正確にモデリングできます。



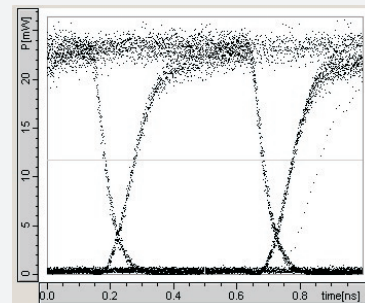
能動素子および受動素子で構成された回路



光再生器の回路レイアウト図



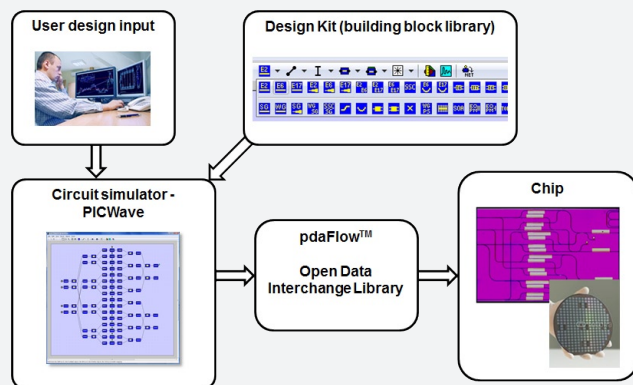
波長 λ_1 の入力信号



波長 λ_2 の再生信号

☑ プロセスデザインキット(PDK)

PICWaveのデザインキットシステムを使用すると、用意されたコンポーネント(ビルディングブロック:BB)のPDKライブラリをインポート、それらを組み合わせて回路を構築できます。InP(インジウムリン)系のJEPPIXプラットフォーム傘下にあるハイニリヒ・ヘルツ研究所(Fraunhofer HHI)やSmart Photonicsのファウンドリ向けPDKなどを提供しています。



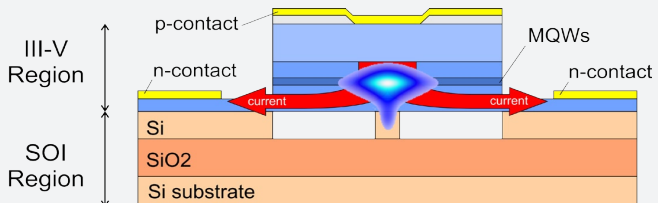
回路モデルの特徴

- 効率的な光回路シミュレータ
- 時間領域進行波(TDTW)光学モデル
- 統合型XY導波路ソルバー
- 光応答スペクトル
- 過渡応答
- 自由な時間領域入力信号(タイムドメイン信号)の設定
- アイパターン(アイダイアグラム)の生成
- 外部の電磁界(EM)ソルバーからのコンポーネントモデルのインポート
- 非線形導波路モデル(PPLN:周期分極反転ニオブ酸リチウム)
- 材料データベースシステム
- ファイバ・ブラッグ・グレーティングモデル(FBG)

Laser diode and SOA modelling

☑ 柔軟なレーザ断面構造(XY平面)のモデリング

アクティブモデルは、リッジ導波路や埋め込みヘテロ構造(BH構造)など、一般的な物理構造にすべて対応しています。シリコン(Si)基板上にインジウムリン(InP)をマウントしたハイブリッドレーザのモデル化も可能です。計算アルゴリズムは、電流の広がり、リーク電流、拡散、空間ホールバーニング(SHB)など、横方向の電流分布およびキャリアプロファイルの詳細を緻密に計算します。ある能動層には利得グレーティング(ゲイングレーティング)を組み込み、別の能動層には可飽和吸収体(サチュラブルアブソーバー)として設計するといった柔軟な構成も可能です。



電流拡散を伴うハイブリッドシリコンIII-Vレーザ

能動(アクティブ)モデルの特徴

- PI曲線およびPV曲線
- 量子雑音(量子ノイズ)
- チャープシミュレーション
- 相対強度雑音(RIN)スペクトル
- 進行波電極モデル
- 非ローレンツ型利得スペクトル
- キャリア拡散および空間ホールバーニング
- 非線形利得 / スペクトルホールバーニング
- 統合型グレーティングソルバー(実数・利得部)
- オージェ(Auger)およびショックレー・リード・ホール(SRH)再結合プロセス
- 利得(ゲイン)テーブルのインポート
- 電界吸収型光変調器(EAM)モデル
- 多準位キャリアモデル

☑ 任意の形状のレーザ共振器に対応

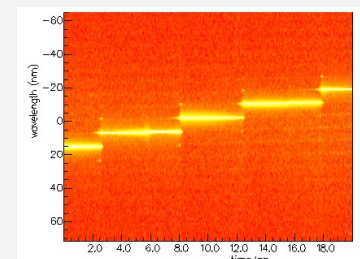
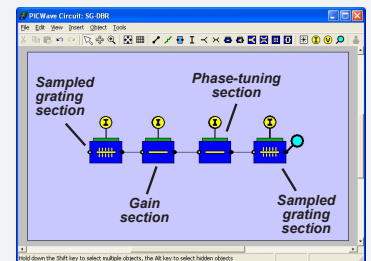
PICWaveは、複数のセクション、ファセット、DBRグレーティング、Y分岐、外部共振器などを備えた複雑な構造を持つ能動デバイスをモデルリングできるため、あらゆる設計案を検証することが可能です。

右上の図は、利得(ゲイン)セクション、波長可変セクション、およびグレーティングセクションで構成されるSG-DBR(サンプリンググレーティング)波長可変レーザのシミュレーションモデルです。各グレーティングは異なるサンプリング周期を持っているため、2つのグレーティングの反射共振が一致する波長間隔の広い特定の波長でのみレーザ発振が生じる仕組みになっています。

右下の図は、SG-DBRのスペクトルの時間変化を示しており、不適切な電氣的制御に起因するモードホップが確認できます。併せて、過渡応答やバックグラウンドノイズも再現されています。

主なアプリケーション例

- ファブリペロー(FP)レーザ
- 分布帰還型(DFB)レーザ
- 分布反射型レーザ(DBR)
- モード同期(モードロック)レーザ
- 波長可変DFBレーザ
- 波長可変サンプル回折格子DBR
- マルチブランチ(多分岐)構成
- リングレーザ
- 外部共振器+変調器
- ファイバ・ブラッグ・グレーティング(FBG)を用いた外部共振器型
- 波長可変型SG-DBR



出力電力の時間変化に伴うスペクトル

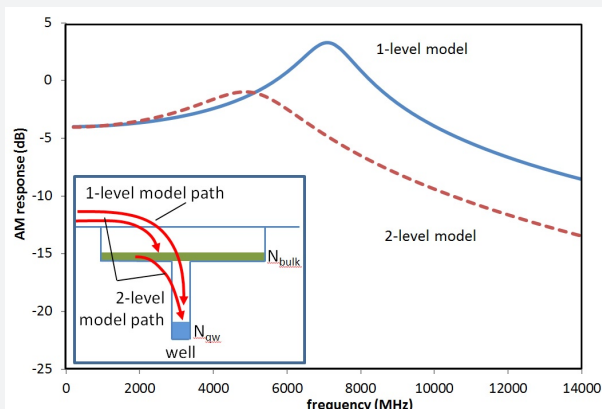
☑ 高度なアクティブ材料モデル

Harold(ハロルド)は、強力な量子井戸ヘテロ構造モデリングツールです。PICWaveはHaroldと緊密に連携し、高速な計算効率を維持しながら、ドーピング効果、詳細なバンド構造、量子井戸効果、そして高度な利得(ゲイン)モデルを正確に反映することができます。

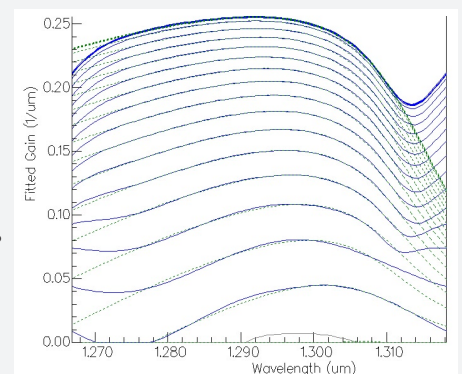
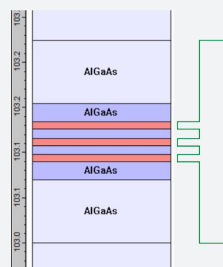
右の図(緑色)は、Haroldによって異なるキャリア密度ごとに計算された利得スペクトルの積層データを示しています。

PICWaveは、時間領域デバイスモデル内でこれらのスペクトルを忠実に再現します。このフィッティングには温度効果を考慮することも可能です。

実測値など、外部からインポートした利得スペクトルのフィッティングにも対応しています。



1準位および2準位キャリアモデル:
(左)各モデルにおけるAM応答と周波数の関係
(下)エピタキシャル構造および量子井戸構造



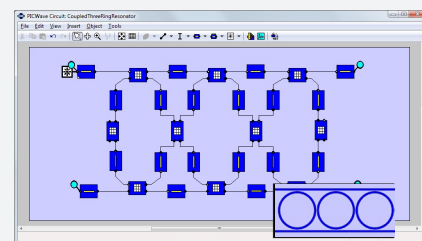
(上図) 3層の量子井戸(QW)を持つInGaAsPエピタキシャル層構造に対して、Haroldが異なるキャリア密度ごとに計算した利得(ゲイン)曲線が緑色で示されています。これに対するPICWaveのフィッティングモデルは青色で示されています。PICWaveは、自然放出再結合、拡散、屈折率データなどHaroldが計算した解析結果をインポートし、フィッティングすることが可能です。

Haroldとの連携から詳細な材料モデルを自動インポート&高精度フィッティング

☑ FIMMPROPとの連携

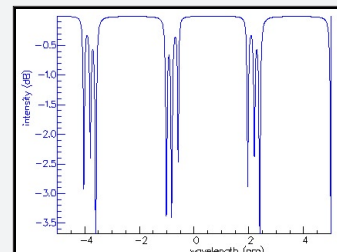
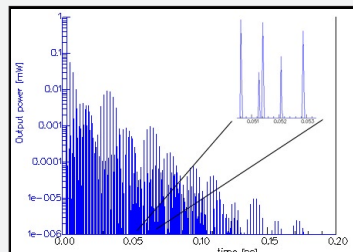
Y分岐などの詳細な電磁界(EM)シミュレーションを行うツールからのシミュレーション結果を「波長依存の散乱行列(Sパラメータ)」の形式でPICWaveにインポートできます。FIMMPROPを使用すれば受動(パッシブ)コンポーネントの詳細な電磁界モデルを作成でき、統合されたプロジェクト管理環境により、わずか数回のボタンクリックで、モデルをPICWaveモデルへスムーズに組み込むことができます。

右図はPICWaveとFIMMPROPを連携させ、直径 $200\mu\text{m}$ の3つの結合リング共振器システムを協調シミュレーション(コ・シミュレーション)した例です。FIMMPROPを用いてリング結合器の結合係数や曲げ損失(ベンドロス)を計算し、PICWaveがこれら個々のコンポーネントを1つの回路へと組み立てます。



3連リング共振器

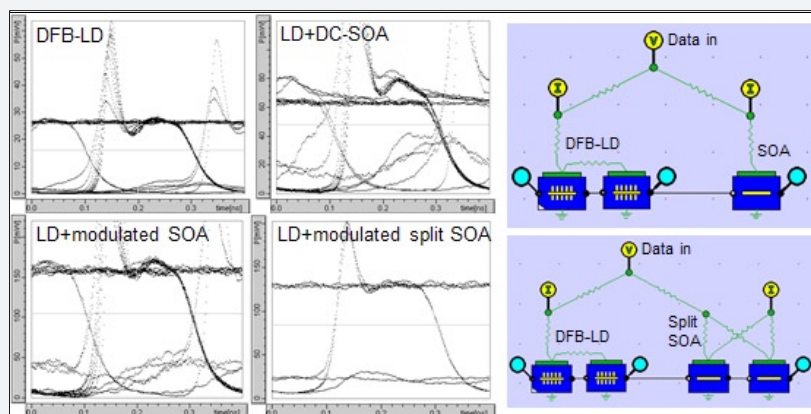
この協調シミュレーションは、例えばFDTD法などの手法と比較して「数桁(オーダー)以上」も優れた計算効率を誇ります。わずか数分の計算時間で、50MHzという高い周波数(波長)分解能と、50nmのスペクトル領域の解析結果を得ることができます。



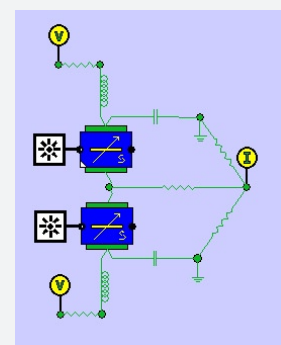
時間領域(左)周波数領域(右)の応答特性

☑ 高速光電子デバイス / 高速光回路設計

PICWaveには、デバイスの断面における電流の流れやリーク電流のモデルに加え、光電子デバイスの電氣的側面をモデル化するための多くの機能が搭載されています。進行波電極モデルを使用することで、シンプルな高周(マイクロ)波モデルを容易に作成でき、電気配線、抵抗器、コンデンサ、インダクタを用いて、電気回路内で電極同士を自由に接続することもできます。これらを組み合わせることで、PICWaveは高速変調レーザー/ SOAや平衡型光検出器といった高速光電子素子を正確にモデル化することが可能になります。



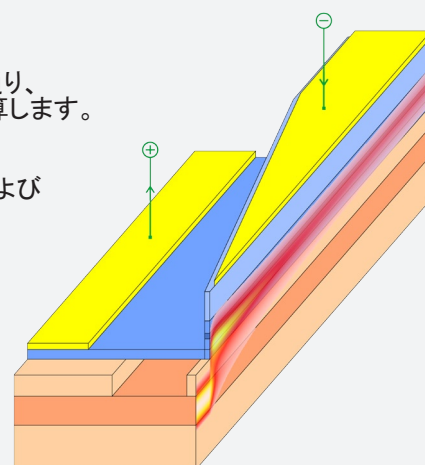
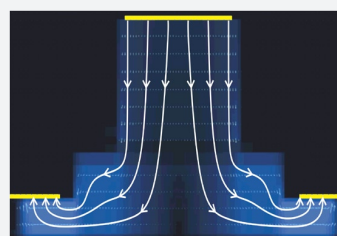
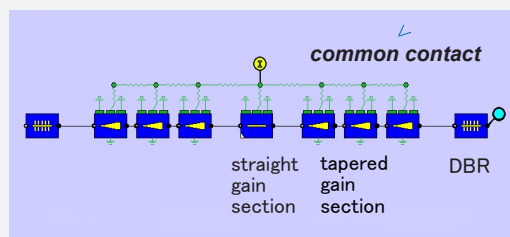
LRC回路を備えた
バランスフォト
レシーバー
(差動型光検出器)



高速直接変調レーザー/ SOAの設計
電氣的接続を追加してSOAを同時に
共変調させることで、デバイス性能を
大幅に向上させることができます

☑ テーパ型ハイブリッドシリコン(III-V/SOI)レーザモデリング

PICWaveは、ハイブリッドInP/SOIレーザの複雑な動的挙動を厳密にモデル化するために必要なすべてのツールを備えています。Harold(ハロルド)からインポートした利得(ゲイン)曲線により、量子井戸(QW)の利得の波長依存性および温度依存性を詳細にモデル化できます。また、電流の広がり(電流拡散)モデルは、中央のp電極から注入された電流が接合部を通り、両側のn電極へと横方向に流れる緻密な挙動を、各層の抵抗率の変化を考慮しながら計算します。このレーザは、シリコン(Si)層からInP活性層へ、そして再びシリコン層へと光を移動させるためにテーパ導波路を採用しています。PICWaveは、テーパの断面形状が変化するのに伴う、導波路モードの変化、電流分布、およびキャリア拡散のすべての変動を完全に考慮して計算します。一般的にハイブリッドレーザでは、レーザ発振のための光フィードバックを得るためにシリコン導波路内にDBRグレーティングを配置します。PICWaveでは回路モデル上できわめて容易に追加することができます。



レーザのテーパ部における、
中央断面の光強度分布

DBR/アクティブテーパ構造を備えた回路のシンボリック・レイアウト

電流の広がり(電流拡散)