

# ディスクリートデバイスプロセス技術

Discrete Device Manufacturing Process Technology

嶋田 兆 杉山 仁 吉武 春二

■ SHIMADA Kizashi ■ SUGIYAMA Hitoshi ■ YOSHITAKE Shunji

東芝は、SiGe-HBT (シリコンゲルマニウム バイポーラトランジスタ) を用いた世界最高レベルの超低雑音 LNA (Low Noise Amplifier) と、12 倍速対応 DVD レコーダ用途の高出力 LD (レーザダイオード) を開発した。

SiGe-HBT の低雑音化のためにはベース抵抗とベース-コレクタ間容量の低減がポイントであり、これらを、ベースプロファイルの最適化と i 線 (波長: 365 nm) 露光技術を駆使した低コストなエミッタ微細化技術で達成した。

また、LD の高出力化はキルクの抑制、COD (Catastrophic Optical Damage) 耐性と放熱性の向上がポイントであり、RIE (反応性イオンエッチング) による微細リッジ加工技術、高温での電流リークを抑制できる絶縁膜ブロック層界面制御技術、及び共振器長の最適化などにより実現した。

Toshiba has developed a low-noise amplifier (LNA) featuring the world's lowest noise figure, incorporating a silicon-germanium heterojunction bipolar transistor (SiGe-HBT) and high-output-power laser diode (LD), for application to 12x DVD recorders. The key points of the lower noise figure of the SiGe-HBT are decreases in the base resistance and in the capacitance between the base and the collector. These were attained by optimization of the base doping profile and the adoption of a 0.18 μm emitter using low-cost i-line lithographic technology. The high light output power of the LD, whose key points are linearity of the current vs. optical output characteristics, catastrophic optical damage (COD) tolerance, and improved heat radiation, was realized by fine ridge patterning with reactive ion etching (RIE), charge control techniques on the insulator-semiconductor interface, and optimization of the cavity length.

## SiGe-HBT プロセス技術

SiGe-HBT Process Technology

### 1 まえがき

近年、携帯電話などの通信機器は小型・軽量であるだけでなく、インターネット接続や動画配信のような通話以外の機能が搭載されている。

このような機能を実現するために、携帯機器の無線回路に使用されるバイポーラトランジスタには高速化 (遮断周波数  $f_T$  の向上, 図 1) ②と低ノイズ化 (雑音指数 NF の低減) の要求が強く、これら要求性能を満たすために、従来の Si-BT に代わる SiGe-HBT の開発を進めてきた。SiGe-HBT プロセスでは、SiGe 層を形成するエピタキシャル成膜での良質な結晶性の確保とその Ge プロファイルの最適化、及び新たな投資を抑えるため既存技術である i 線露光技術の微細化を追求し、高速化と低ノイズ化を実現した。

以下にその概要を述べる。

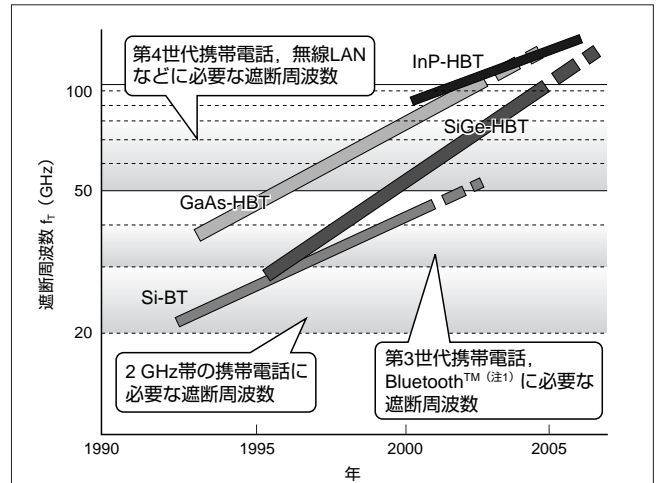


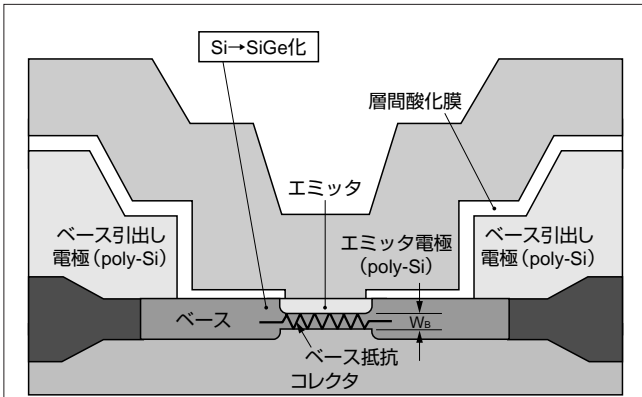
図 1. デバイス技術と遮断周波数の関係 — SiGe-HBT は 5 GHz の周波数帯に應用できるようになっている。遮断周波数は素子の電流増幅率が 1 になる周波数を指し、高速動作性能を示す指標に使われる。InP-HBT、GaAs-HBT の遮断周波数は高いが、チップコストも高いのが課題である。

Chronological trend of cutoff frequency due to development of device technologies

### 2 SiGe-HBT の特徴

HBT 構造を図 2 に示す。エミッタ、ベース、コレクタから成

(注 1) Bluetooth は、Bluetooth SIG, Inc. の商標。



poly-Si : 多結晶シリコン

図2. バイポーラトランジスタの素子構造 — ベース領域  $W_B$  を狭くすると、ベース抵抗  $R_B$  が上がりトランジスタのノイズ (NF) が大きくなる。

Schematic cross-sectional view of bipolar transistor element

る HBT の動作速度は、電子がエミッタ領域からコレクタ領域へ到達するまでの時間で決まり、このとき、ベース領域を狭くすることで電子が移動する距離を短くでき、高速化が可能となる。

従来の Si-BT は、ベース領域 ( $W_B$ ) を狭くするとベース抵抗 ( $R_B$ ) が上がり、トランジスタのノイズが大きくなるので、 $R_B$

上昇を抑えるためベースの B (ボロン) 濃度 ( $N_B$ ) を大きくする。しかし、単純に  $N_B$  を大きくすると、トランジスタの基本性能である電流増幅率 ( $h_{FE}$ ) が低下する。この課題を解決するのに、SiGe のバンドギャップナロー効果を利用する。SiGe 層のバンドギャップの概略を図3に示す<sup>(2)</sup>。SiGe は Si 格子の一部を Ge で置き換えたもので、Ge 濃度を 15% 程度にすると、バンドギャップが約 0.1 eV 狭くなる。これにより、エネルギーバリアを拡大できるため、ベース領域からエミッタ領域へのホールの注入を抑制でき、 $N_B$  を大きくしても  $h_{FE}$  が低下せず、ベース領域を狭くできる。

また、高速化 ( $f_T$  の向上) にはベース領域の Si に Ge を注入して、傾斜型 Ge プロファイルによる電界加速効果で、トランジスタの高速化を実現する。これは、ベース領域からエミッタ領域に向かうにつれ Ge 含有量を連続的に減らし、傾斜 Ge プロファイルを形成することで電界が発生し、エミッタから注入された電子がベース領域内で加速して  $f_T$  向上が可能となる。

低ノイズ化には、 $R_B$  の低減やベース-コレクタ間容量の低減が効果的である。 $R_B$  を下げるには、ベース引出し長の短縮化が有効であり、エミッタ開口寸法やベース開口寸法の微細化が必要となっている。

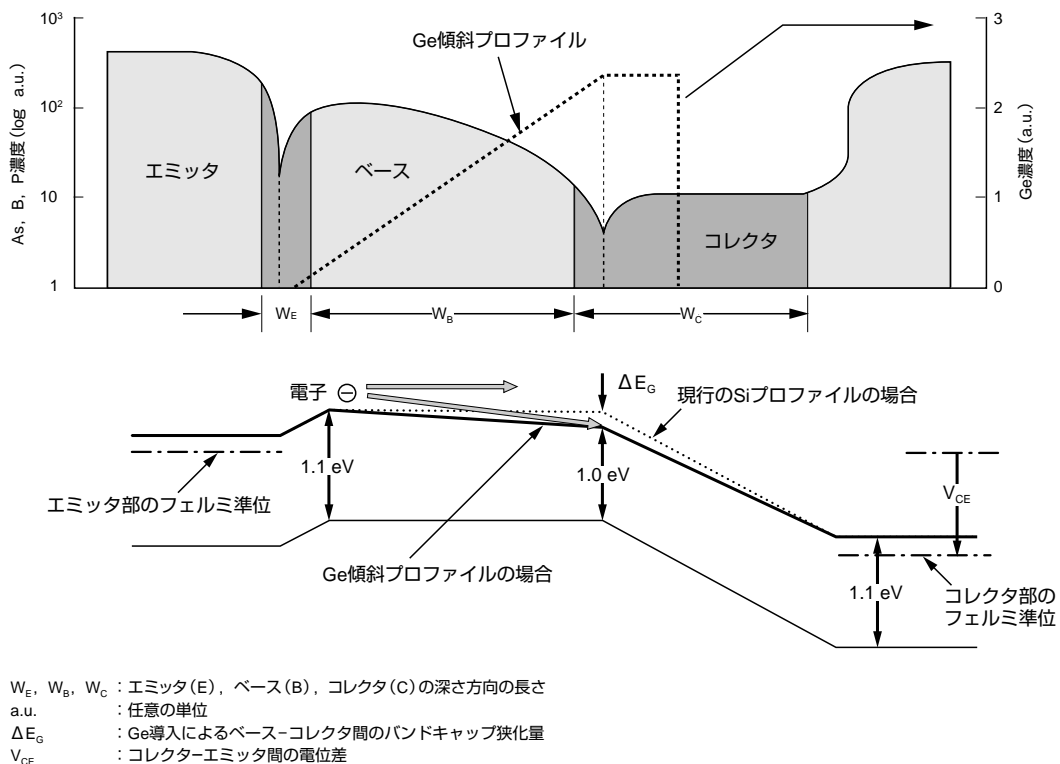


図3. ベース領域に SiGe 層を適用した場合のバンドギャップ — ベース領域に Ge を含有すると、Si だけの場合に比べてバンドギャップは 0.1eV 程度狭くなり、更に Ge 含有量を傾斜させると、電子の移動が加速される。

Band gap diagram showing effect of SiGe layer applied to base region

### 3 SiGe エピタキシャル技術

#### 3.1. SiGe 層の形成方法

SiGe ベース領域は、エピタキシャル成長法により形成する。この方法では、減圧 CVD (化学気相成長) 装置により、 $H_2$  (水素) ガスをキャリアガスとして、真空雰囲気中に  $SiH_4$  (シラン)、 $GeH_4$  (ゲルマン)、 $B_2H_6$  (ジボラン) の各々の高純度ガスを導入し、B をドーピングした SiGe 膜を単結晶 Si 上に成膜させる。

#### 3.2. Ge 含有量の適正化

Si 中の Ge 含有量を増やすと、Ge 原子は Si 原子より原子半径が 4.17% 大きいので、格子定数の違いから格子ひずみが発生し、結晶性が良質な膜を得ることが難しい。Ge 含有量

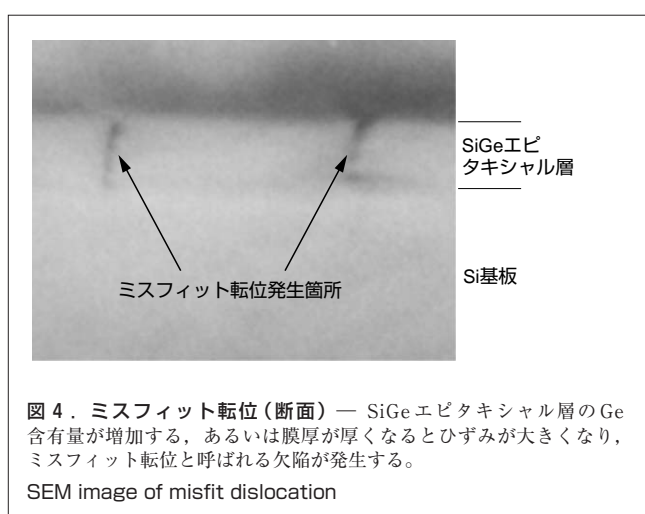


図 4. ミスフィット転位 (断面) — SiGe エピタキシャル層の Ge 含有量が増加する、あるいは膜厚が厚くなるとひずみが大きくなり、ミスフィット転位と呼ばれる欠陥が発生する。

SEM image of misfit dislocation

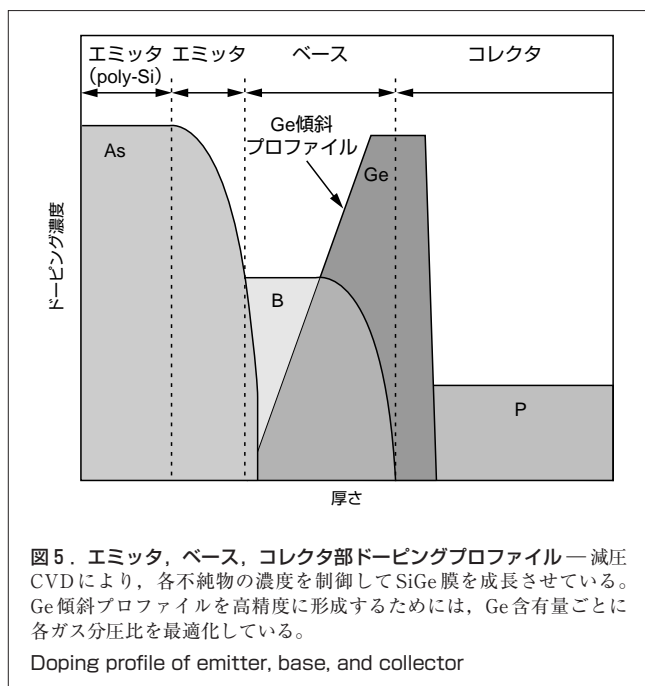


図 5. エミッタ、ベース、コレクタ部ドーピングプロファイル — 減圧 CVD により、各不純物の濃度を制御して SiGe 膜を成長させている。Ge 傾斜プロファイルを高精度に形成するためには、Ge 含有量ごとに各ガス分圧比を最適化している。

Doping profile of emitter, base, and collector

が多すぎると、図 4 のようにミスフィット転位と呼ばれる結晶欠陥が発生し、また、膜厚が厚くなるとひずみが大きくなるため、形成できる膜厚に限界 (臨界膜厚) がある。これらを踏まえ、膜厚、Ge 含有量とミスフィット転位、SiGe 膜の結晶性、膜表面状態の評価から、適正膜厚と Ge 含有量を決定している。

#### 3.3. Ge 傾斜プロファイルの形成

SiGe エピタキシャルの成長速度は、温度、圧力、ガス分圧に依存している。Ge $H_4$  分圧を増加すると、その触媒作用により  $SiH_4$  ガスの分解反応が促進され、成長速度が変わる。傾斜 Ge プロファイルを図 5 のように高精度に形成するため、Ge 含有量ごとに各ガス分圧比を最適化している。

### 4 エミッタ開口寸法の微細化技術

HBT をシュリンクするためのエミッタ開口寸法の微細化は、パターン転写する露光装置を KrF (フッ化クリプトン) エキシマレーザのような短波長光を用いる装置にすることにより可能である。しかし、KrF エキシマレーザは高価で膨大な投資が必要となり、製品のコストアップにつながる。ここでは、i 線露光技術の微細化限界と言われるエミッタ開口寸法 300 nm から更に微細化する技術の開発を進めた。微細化を進めるには、有機膜材料を使用したサイドウォールプロセスにより、片側寸法を 60 nm ほどシュリンクさせ、エミッタ開口寸法 180 nm を達成している。これによりベース開口寸法を微細化してトランジスタ寸法もシュリンクできるため、ベース抵抗とベース - コレクタ間容量の低減、すなわち NF の低減が可能となっている。

### 5 あとがき

SiGe ベース形成の最適化とエミッタ開口寸法の微細化により、世界最高レベルの低ノイズ LNA トランジスタ (製品名 MT4S102T,  $f_T = 25$  GHz,  $NF = 0.52$  dB ( $f = 2$  GHz)) を 2003 年に製品化した。

更なる  $f_T$  向上と NF 低減のためには Ge 含有量の増大が必要となるが、それには SiGe-HBT の課題の一つである Ge 含有による格子ひずみ、すなわち結晶性劣化への対策が重要である。今後、不純物添加による SiGe エピタキシャル成膜技術の開発を進め、トランジスタの特性向上に取り組んでいく。

(嶋田/杉山)

# 高出力LD プロセス技術

High Power LD Process Technology

## 1 まえがき

近年、データや映像を保存する場合の情報量の増大とともに、書き込み用CD(CD-R(Recordable)/CD-RW(Rewritable)、容量640 Mバイト)に代わって書き込み用DVD(DVD-RAM/±RW/±R、容量4.7~9.4 Gバイト)の用途が増大し、また、DVDドライブの書き込み速度も高速化して、従来の等倍速品から現在では8倍速品が市場に出回っている。それに伴い、書き込み用DVDに必要とされるLD出力は、書き込み速度の約1/2乗に比例するため<sup>(3)</sup>、3年前の30 mW(等倍速)から去年は140 mW(8倍速)にまで増加し(図6)、現在では200(12倍速)~250 mW(16倍速)LDの開発が行われている。

LDの高出力化のために行ったプロセス技術開発について述べる。

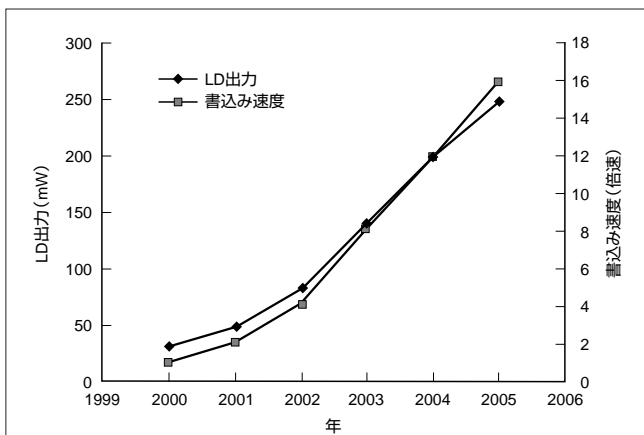


図6. 高出力LDの出力と書き込み速度のトレンドー DVD用LDの出力は、書き込み速度の約1/2乗に比例する。

Trend of high-power LD output and writing speed

## 2 高出力LD 構造の概略

660 nm DVD用高出力LDの概略構造を図7に示す。GaAs(ガリウムヒ素)基板上に、n型InGaAlP(インジウムガリウムアルミニウムリン)クラッド層、ノンドープのInGaP/InGaAlPのMQW(多層量子井戸)活性層、p型InGaAlPクラッド層をMOCVD(有機金属化学相成長)で形成している。LD領域はリッジ形成を行い、リッジ近傍に電流ブロック層を形成し、その屈折率差で横方向の光モードを制御している。

高出力化のためには、①キンの抑制、②COD耐性の

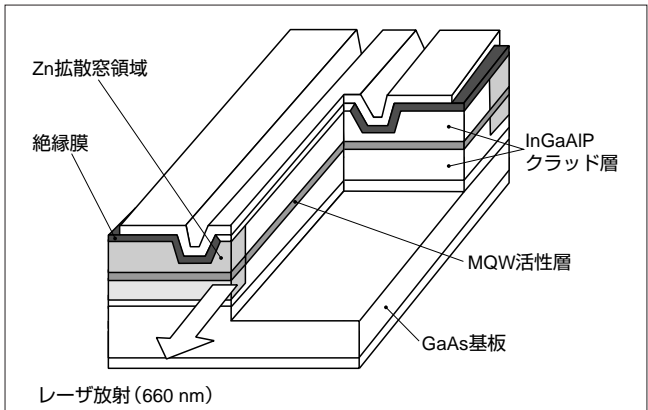


図7. 高出力LDの構造ー GaAs基板上に、n型InGaAlP型クラッド層、InGaP/InGaAlPのMQW活性層、P型InGaAlPクラッド層をMOCVDで形成している。

Structure of high-power LD for writable DVD

向上、③発熱の抑制と放熱性の向上が必要である。キンクとは、図8に示すように、電流-光出力特性の直線性(高出力LDは書き込みと読込みの両用途のため、直線性領域の使用が必要)がなくなる点を指す。その原因は、横モードが出力上昇につれて不安定になり、高出力化とともに単一モードから多重モードへ変化することが主原因である。キンクを抑制するにはリッジ幅を縮小することが有効である。

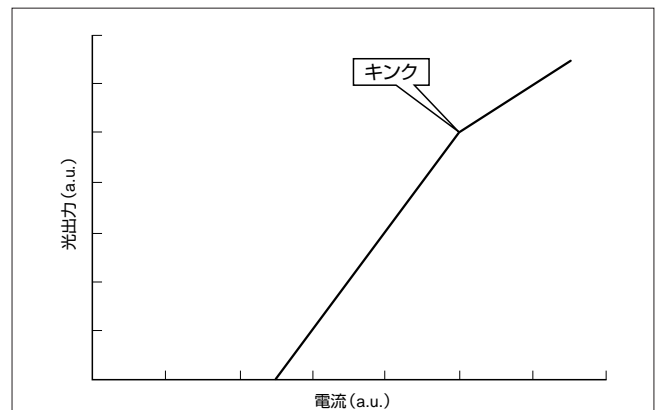
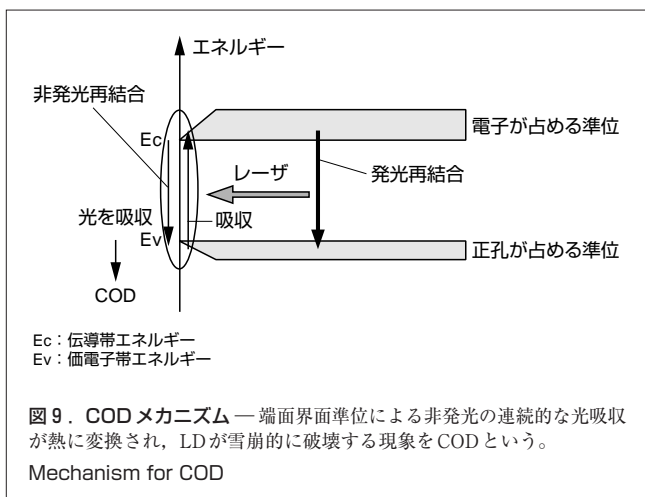


図8. 電流-光出力特性とキンクー キンクは、出力上昇につれて横モードが不安定になり、単一モードから多重モードへ変化することが主原因で発生する。

Current vs. optical power output characteristics and kink

CODとは、LD端面の界面準位による非発光の連続的な光吸収が熱に変換され、LDが雪崩的に破壊する現象である(図9)<sup>(4)</sup>。その対策として、バンドギャップの広い窓領域を形成している。

以下に、主要なプロセス技術の開発について述べる。



### 3 要素技術開発

#### 3.1 リッジ加工技術と形状制御技術

LDの高出力化のためには、リッジ上部幅を保ったままリッジ下部幅を小さくする必要があるが、従来のウエットエッチング処理では、p型クラッド層だけ選択的にエッチングし、ストップ層(LD特性に関係するリッジ周辺のp型クラッド層厚を制御するために導入)でエッチングをストップすることは可能であるが、異方性エッチングのため順テーパリッジ形状となり、リッジ下部の微細化に伴ってリッジ上部が細くなり、動作電圧が増加するという問題があった。そこで、RIEとリッジを保護しながら後処理をする技術などで垂直なリッジ加工を実現し、動作電圧を増加させることなく、リッジ幅を2 μm以下に微細化することができた。

#### 3.2 COD耐性向上技術

COD劣化を抑制するためには、窓部のエネルギーバンドギャップを内部MQW層のそれより広くしなければならぬ。そのため、LD端面にZn(亜鉛)を拡散させ、活性層を無秩序化する。これにより、エネルギーバンドギャップが広い窓部を形成することができ、その結果250 mWまでCODフリーを達成した。

#### 3.3 発熱抑制と放熱性改善技術

入力したエネルギーの大部分はLD内部抵抗によりジュール熱として発熱するため、リッジ部を低抵抗化し発熱を抑制した。放熱性改善としては、LD共振器長を最適化することで放熱性を向上している。その結果、従来に比べて大幅に温度特性を向上することができた。

#### 3.4 絶縁膜ブロック層とそのほかのLD形成技術

ブロック層としては、従来のエピタキシャル成長したブロック層に代わり、エピタキシャル成長回数の低減と高温(温度保証: 75℃以下)でのリーク電流を抑制するため、絶縁膜を採用している。コンタクト開口はリッジ上全面に行った。

また、絶縁膜上にp型半導体層用コンタクト電極(p電極)を作成するため密着性のよい材料を選択し、p電極コンタクト層から活性層へのp型不純物拡散を抑制することにより、通電時のLD特性の劣化を抑制することができた。

以上の要素技術開発により、200 mWの高出力LDを開発し、75℃で200 mWのパルス動作を確認した。

### 4 あとがき

赤色(660 nm)DVD用LDの出力は、ドライブ回転数の限界から最大250 mWで十分と考えられ(ただし、2層ディスクへの書き込みには300 mWが必要と予想)、今後、動作電圧の上昇を伴わないリッジ微細化と発熱抑制技術が必要である。また、次世代高密度記録システムとしては405 nmの青紫色LDが必要とされ、LD構成材料がGaN(窒化ガリウム)系に代わるため、この材料に適した電極技術、エピタキシャル成長技術などの開発が必要となる。(嶋田/吉武)

### 文献

- (1) S.S.Iyer, et al. Heterojunction Bipolar Transistor Using Si-Ge Alloys. IEEE Trans. Electron Devices. 36, 1989, p.2034 - 2063.
- (2) 加藤雅浩,ほか. 汎携帯主義.日経エレクトロニクス. No.773, 2000, p.140 - 145.
- (3) B. Bartholomeusz, et al. Thermal modeling studies of organic compact disk-writable media. Appl. Opt. 31, 7, 1992, p.909 - 918.
- (4) H.C.Casey, et al. Heterostructure Lasers Part B. New York, Academic Press, 1978, p.277 - 287.



嶋田 兆 SHIMADA Kizashi

セミコンダクター社 プロセス技術推進センター 半導体プロセス技術開発第一部長。パイボラ、ディスクリットデバイスのプロセス開発に従事。

Process & Manufacturing Engineering Center



杉山 仁 SUGIYAMA Hitoshi

セミコンダクター社 プロセス技術推進センター 半導体プロセス技術開発第一部長。パイボラトランジスタのプロセス開発に従事。応用物理学会会員。

Process & Manufacturing Engineering Center



吉武 春二 YOSHITAKE Shunji, D.Eng.

セミコンダクター社 プロセス技術推進センター 半導体プロセス技術開発第一部長。工博。半導体発光ダイオードのプロセス開発に従事。

Process & Manufacturing Engineering Center