

SiGeエピタキシャル成長技術と 次世代通信技術

イノテック(株) 土屋 宜司氏

1. 始めに

半導体の世界にその黎明期から身を置かれた諸先輩が多くの体験をお持ちのようにSiが半導体の主役となる前の主役はGeであった。そのGeがSiGeとして再び脚光を浴び始めた。次世代通信システムを支える半導体デバイスの心臓部として、今大きな役割を期待されている。以下、その背景、原理、用途についてご紹介したい。



土屋 宜司氏

2. 次世代通信技術

ここ数年で携帯電話が瞬く間に普及した。携帯電話を中心とした、いわゆるモバイルツールはインターネット、パソコン、半導体技術の進歩と相俟って、技術革新のブームを引き起こしている。それは今始まったばかりで、これからさらに第2波、第3波の技術革新の波が寄せて来ようとしている。

その中で、パソコン、携帯電話、家電の境界線は曖昧なものとなり、勤務、購買、管理、予約、入出金、診断、教育、情報交換、など、業務、生活の根幹を成す部分の形態が大きく変化する可能性を秘めている。

これらの発展を支えるものとして不可欠なのが、高速大容量の無線通信あるいは光通信技術である。今後急速にギガヘルツ帯に移行し、2001年に始まる次世代移動体通信システムIMT2000では2GHz帯を使用する。また、家電、ホームセキュリティーシステムなどを無線でつなぐ短距離無線通信規格ブルートゥースは2.4GHz帯を使う。これにモバイル機器などをつなげば遠方からの監視、制御、探索が可能になる。高速大容量化はさらに進み、周波数は近い将来5GHz、10GHz、さらには数十GHzと飛躍的に増大すると予想されている。数十GHz帯のミリ波を利用した高度道路交通システムITS (Intelligent Transport Systems) も研究され始めている。日本の通産省、運輸省などが主導するシステムは2005年実用化を目標に開発が進められる。

一方、基幹通信ラインは光ファイバー網で構築されつつある。さらにNTTは家庭までの光ファイバー化FTTH (Fiber To The Home) の構想を有する。光通信の伝送速度は一波長あたり2.5Gbit/秒から10Gbit/秒、40Gbit/秒と急速に高速化する見通しである。

3. III-V族

今までは、この分野の高周波、高速デバイスはGaAsを始めとするIII-V族の世界であった。III-V族は、異種の半導体間の接合(ヘテロ接合)により、エネルギーバンド構造を種々コントロールできる、高移動度が得られる、直接遷移型バンド構造を形成できるなどすばらしい特徴がある。ところが、IV族と一緒に出来ない、などの理由から、高集積化には不向きで、その魅力にも拘らず単体のデバイスから小規模のICまでしか製作されなかった。その一方、レーザーダイオード、LEDのような発光デバイスとしても使われている他、基幹回線、超高周波、超高速用デバイスなどを対象にした分野では最先端デバイスとして研究開発が続けられている。

4. SiGe ヘテロバイポーラデバイス

SiGeはGeのバンドギャップが0.66eVと、Siの1.11eVに比べて小さい上にGeの添加比率によりバンドギャップを連続的に変えられる。また、GeのSiに対する相溶性は100%固溶のために組成比も連続的に自由に変わることができる。さらにSiGeはSiとGeの格子定数が異なる(Si: 5.43Å, Ge: 5.82Å)のために、結晶として成長させた場合に、歪(ストレイン)を有することになる。これがバンドギャップをさらに縮めることになる。この現象を利用してSiGeヘテロ接合バイポーラデバイス(HBT)の開発が進められている。また、SiGe HBTとCMOSを組み合わせるBi-CMOSを作ろうという試みが随所で行われ始めた。HBTでは、そのベース部分にSiGeのエピタキシャル成長を行う。その膜厚は20~50nm程度で上に述べた様にSiとGeの格子定数の相違による結晶の歪を内在させている。膜厚が厚くなりすぎると歪が緩和されて転移が発生し、結晶欠陥によるリークの恐れが出る。その限界の厚さを臨界膜厚と言って、Geの組成比、結晶の成長条件によって異なるが、おおよそGe20%の場合100~200nm、Ge50%では10~20nmとなる^{1),2)}。

バンドギャップの作り方には傾斜型とボックス型がある。

傾斜型は、エミッタ側からコレクタ側に向かって垂直方向にGeの濃度勾配をつけコレクタ側のGe濃度を高くする。たとえばエミッタ側を0%、コレクタ側を20%としてエミッタからコレクタに向けてバンドギャップを次第

に小さくする。このようにしてドリフト電界を作ることによって電子を加速出来る。結果として電子の走行時間を縮めることが出来る。ボックス型はベース層のGeの濃度を一定にしてドリフト電界を作らずにエミッタとのバンドギャップ差を大きくしておくことにより大きな電流利得を得る。逆にいえば、電流利得を大きく出来る分、ベース濃度を高めることが出来、ベース抵抗を低減させることができる³⁾。

5. SiGeのFETへの応用

一方FETへの応用としてSiGeでHEMT (High Electron Mobility Transistor) 構造を作ろうという試みも研究され始めている⁴⁾。HEMT構造ではバンドギャップの広い層に不純物をドーピングしておき、そこからバンドギャップの狭いSiGe層に電子を供給する。このエネルギーの低い層に集まった電子はその層にイオン化したドーパントが存在しないために散乱を受けずに高速で移動できる。電子ではなく正孔の移動度を増大させることもできる。

6. SiGeC

SiGeに同じIV族のCを加えることがある。Cを添加させるとドーパント、たとえばボロンのアウトディフュージョンを抑えることが出来る。私どもが取扱っている米国アリゾナ州のローレンス半導体研究所はIV族のエピタキシャル成長を専門としている会社であるが、特にこのC添加を得意としており、特許も有している。C添加の場合には800°C 30分の加熱をしてもドーパントのプロファイルが変化しない。従って、急峻なプロファイルを作り出すことが出来る。それが高周波特性にも良い影響を与える。図1にカーボンを追加した場合としない場合のHBTの出力特性の差異を示す。ドーパントはボロンである。カーボン添加のほうが明らかに良好な特性を示す⁵⁾。

7. SiGeデバイスの特徴

これまでに述べた特徴からさまざまなメリットが生まれる。IV族であるために既存のMOS、バイポーラのラインでデバイスを作ることが出来る。III-V族の場合

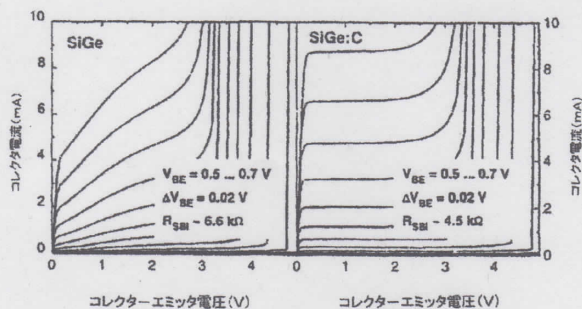


図1 カーボン添加有(右)無(左)による100×100mm² HBTの出力特性の差異

はそれ自体がドーパントになるため、全く不可能である。SiGeではエピ成長さえ外注すれば、残りは通常のMOS、バイポーラのラインで通常の工程を用いてデバイスを作ることができ、コストは最小で済む。その上、相対的にパターン寸法は緩いため最先端ラインを使わなくても済む。GaAsに代表されるIII-V族より消費電力が小さく、モバイルツールの電池の長時間化に寄与出来る。III-V族よりも安価である。また、GaAsに比べ、安全、環境への影響は極めて小さいと考えられる。

8. SiGeの用途

IV族のバンドギャップ エンジニアリングはこれまで未開拓の分野であり、高周波、高速デバイスとしてさらに新たな発展の可能性が開けている。CPUに使われる可能性もある。メモリーなどと共に種々の機能を集積化した1チップシステムLSIを構築できる。結果として、部品点数を大幅に削減できる。

一方でSiGeによるアバランシェ フォトダイオードを用いた光検出器が試作されている⁶⁾。また、Siは間接遷移型であるがSiGeとSiの超格子によって直接遷移型を実現するという可能性も研究されている。これにより発光素子、ひいては、光電気集積回路(OEIC)の可能性も出てくるが、まだ研究途上である。

9. 終わりに

SiGeは現在最も注目されている半導体材料の一つと言える。今後の高周波、光通信の分野での飛躍的な発展が予想される。内外の大手半導体メーカーも非常に注目している。しかしこのエピタキシャル技術は非常に難しく、かなりの技術格差が存在している様に思われる。ここでエピタキシャル層成長メーカーと半導体メーカーの橋渡しを努め、SiGe技術の普及の一翼を担う事が出来ればと考える次第である。

文献

- 1) 古川清二郎, 雨宮好仁編著 シリコン系ヘテロデバイス, 1991, 丸善.
- 2) R. People and J. C. Bean, *Appl. Phys. Lett.* **47** (1985) 322.
- 3) 鷲尾勝由, 応用物理 **69** (2000) 166.
- 4) D. J. Paul, A. Ahmed, N. Griffin, M. Pepper, A. C. Churchill, D. J. Robbins and D. J. Wallis, *Thin Solid Films* **336** (1998) 181.
- 5) H. J. Osten, B. Heinemann, D. Knoll, G. Lippert and H. Rücker, *J. Vac. Sci. Technol. B* **16** (1998) 1750.
- 6) H. Temkin, T. P. Pearsall, J. C. Bean, R. C. Rogan and S. Luryi, *App. Phys. Lett.* **48** (1986) 963.