

化合物半導体電子・光デバイスのための 有機金属気相成長法の開発と大規模商用化への先駆的貢献

ラッセル・ディーン・デュプイ博士

1947年7月9日生まれ(77歳)
ジョージア工科大学 教授

情報化社会を支える化合物半導体デバイス

現在の情報化社会では、演算などを行うシリコンデバイスだけでなく、光や電波などの扱いに適した化合物半導体から作られる電子・光デバイスも重要な役割を果たしています。

化合物半導体とは、2種類以上の元素からなる半導体材料のことです。デバイスにするときには、基板の上に原子が層状に積層された厚さが数～数百ナノメートル(1ナノメートルは10億分の1メートル)ほどの薄い単結晶の膜を作製します(図1)。このような薄膜の大規模商用生産には、「有機金属気相成長法(MOCVD)」が広く用いられています。たとえば、窒化ガリウム(GaN)やガリウムヒ素(GaAs)の薄膜を作るには、原料となるトリメチルガリウム($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$)などの有機金属をガス(気体)にして反応器に供給することから、このような名前が付けられました。

MOCVDのように原子を積層して単結晶薄膜を作製する技術は「エピタキシャル結晶成長技術」と呼ばれ、ほかにも液相エピタキシー法や分子線エピタキシー法などがあります。1970年代にはどの方法が化合物半導体の商用生産に適しているかが盛んに研究されていました。その中で、MOCVDに着目したのがデュプイ博士です。

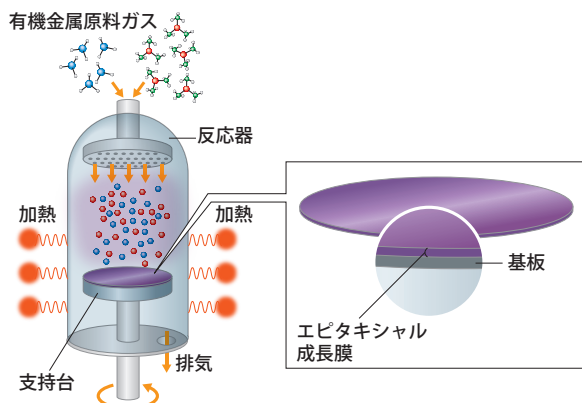


図1: MOCVD装置の反応器の模式図と形成される膜のイメージ

有機金属気相成長法(MOCVD)とは

図2には、代表的な化合物半導体の1つであるガリウムヒ素をMOCVDで製造する際に、どのような反応が起こるかを示しました。ガリウムヒ素はシリコンよりも電子の移動速度が速いため高速通信に適しているだけでなく、赤外線を用いた光センサとしてテレビやエアコンのリモコンなどにも広く使われています。

その製造工程では、有機金属であるトリメチルガリウム($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$)のガスと、水素化ヒ素(AsH_3)のガスを混合したものを反応器に供給して熱分解します。その結果、有機物がとれたガリウム原子とヒ素原子が、基板上に規則正しく積層して、ガリウムヒ素の単結晶膜を形成します。このように原子レベルで精密に制御された非常に薄い膜が、光センサなどの所望の機能を発揮するのです。

原料がガスの状態で供給されるMOCVDは、ほかのエピタキシャル結晶成長技術に比べて、大面積で平らな膜を比較的短時間で形成することができます。さらに超高真空の環境を必要としないなど、量産に有利な特徴をいくつも持っています。しかし研究の初期には「MOCVDできれいな膜を成長させることは難しい」という報告も多く、一時はその研究が衰退した時期もありました。

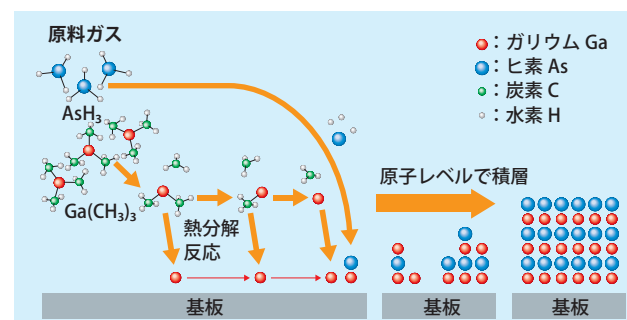


図2: MOCVDによるエピタキシャル結晶の成長過程

原料ガスが熱分解して、必要な元素だけが基板上に積層して結晶を形成する。

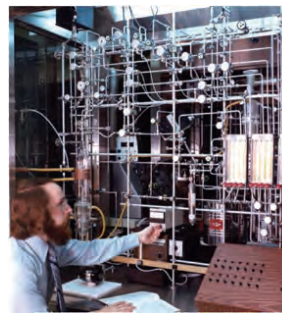
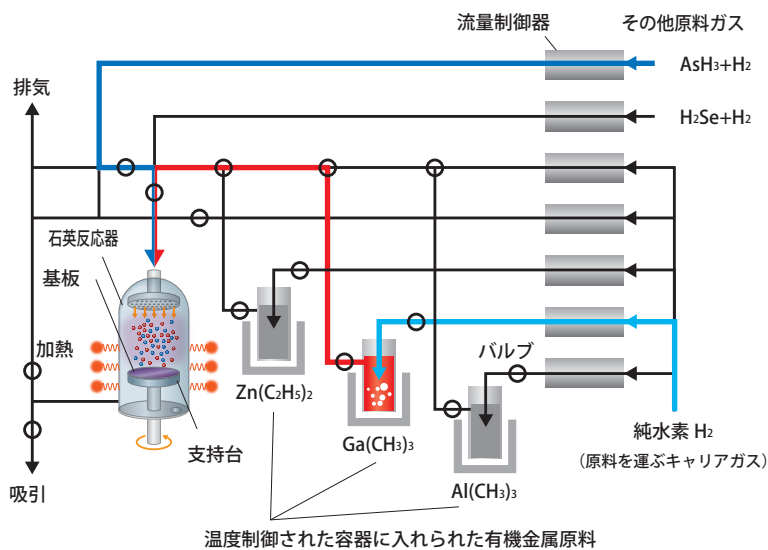


図3：デュプイ博士が開発した1号機(1975年10月撮影)と装置の動作の一例

気化させた有機金属を水素や窒素などのキャリアガスで運び、バルブで流量を制御することで、原料ガスが石英の反応器に精密な割合で供給される。反応器内では、供給された原料ガスが熱分解して、必要な元素だけが基板上に積層してエピタキシャル単結晶薄膜を形成する。

写真の出典：R.D. Dupuis, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron* 2000, 6 (6), 1040-1050.

MOCVD 装置の改良で大規模商用生産が可能に

1970年代前半、デュプイ博士は、結晶成長の過程を詳細に解析し、それに基づいてMOCVD装置にさまざまな改良を加えました(図3)。まず、ガス配管を効率化してガスの流れを高速に切り替えるシステムを構築しました。さらに、原料ガスの供給容器を独自に設計した全溶接型のものに變更して、不純物の混入や原料ガスの漏出を可能な限り防いで、原料の安定供給を実現しました。また、バルブスイッチの開閉をコンピュータ制御にすることで原料の組成を自在に変え、2つの異なる化合物半導体を積み重ねたヘテロ接合を容易に作製できるようにしました。

このようにさまざまな工夫をすることで、MOCVDによって厚みが一定で欠陥のないきれいな膜を大面積かつ高速で作れることを実証したのです。1977年には、新たに構築したMOCVD装置でガリウムヒ素とアルミニウムガリウムヒ素の2種類の半導体を3層重ねることで上下に2つのヘテロ構造を有するダブルヘテロ半導体を作製し、室温でのレーザーの連続発振に世界で初めて成功しました。ほかにも高効率な太陽電池や、膜の厚みで発光波長を調節できる量子井戸レーザーも作製しました。これらの研究成果は、MOCVDが実用に耐えうる半導体ヘテロ接合の作製に有用であることを示すもので、その後の商用大量生産の契機となりました。

社会が求める新しい機能の商用化を支える

半導体レーザーは今日、光通信やDVDの読み取り機能、レーザーポインター、バーコードスキャナーなどに広く用

いられています(図4)。さらに一部の太陽電池なども、デュプイ博士が発展させたMOCVDや化合物半導体製造の技術によって生産されています。

特に青色LEDを含むさまざまなLEDは、従来の電灯に比べて省電力で明るい光を提供するため、世界中の照明器具に使われるようになっており、MOCVDによって生産されるLED照明の市場はますます大きくなっていくでしょう。さらに、複数の元素の組み合わせによってさまざまな機能を作り出せる化合物半導体は、これからも新しい電子・光デバイスの開発に寄与するものと期待されます。

ラッセル・デーン・デュプイ博士が突破口を開いた化合物半導体生産の商用化は、現在の情報化社会の基盤となったばかりではなく、今後の社会の発展にも欠かせない役割を果たしていくもののなのです。

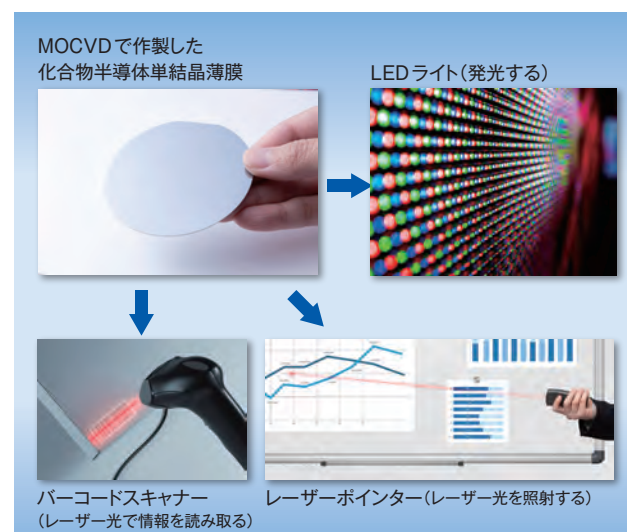


図4：MOCVDで作製した化合物半導体の応用分野

化合物半導体が幅広く応用される中で、ここでは特にLEDや半導体レーザーなどの光デバイスの例を示した。