

光学論文受賞論文紹介

魚見和久氏の論文紹介

今回、光学論文賞の対象となった魚見和久氏の論文は多重量子井戸型半導体レーザーに変調ドーピングを行った新しいレーザーの理論解析と実験結果に関するものである。論文は、IとIIの2編よりなっており、Iでは理論解析と素子設計、IIでは試作した素子の評価結果について述べてある。これらは、一対でこの研究の全貌がわかるようになっている。

多重量子井戸型レーザーは、電子が閉じ込められる量子井戸層と、これより禁制帯幅の大きな障壁層を多数積層した多重量子井戸構造を活性層にもつレーザーである。量子井戸層の厚さはきわめて薄いので、ここに閉じ込められる電子の2次元性により、しきい電流値の低減や、半導体レーザーの高速特性を決めている緩和振動周波数の向上が図れるなど、半導体レーザーの高性能化に有用であることは良く知られている。近年分子線成長法や有機金属気相成長法などによる化合物半導体の超薄膜成長が可能となったことにより、活発に研究が行われ、すでに実用化もされている。

本論文は、多重量子井戸中の障壁層のみに高濃度の不純物をドーピングした構造、すなわち変調ドーピング構造を初めて提案し、この構造を持つレーザーの素子特性を理論的、実験的に調べた結果を纏めたものである。変調ドーピングの考え方そのものはヘテロ構造のFETなどで良く知られているが、本論文の変調ドーピング構造は、これを単にレーザーに応用したものではなく、以下に紹介するように全く新しい考え方に基づくものである。

論文Iでは、理論解析方法と結果について述べてある。障壁層に不純物をドーピングすると、励起されたキャリアは、障壁層の厚みがきわめて薄いので、井戸層に閉じ込められる。井戸層内では、熱平衡状態で多数のキャリアが存在することになる。これに電流が注入されたときの電荷中性条件は、多重量子井戸層全体では成立しているが、井戸層内では成立していないという興味ある状態が実現される。とくに通常行われるように活性層自体に不純物をドーピングした時には、不純物準位によるバンドテイルが生ずるが、変調ドーピングの場合にはこの影響を無視することができる。この仮定のもとに、障壁層にp型、n型おのおのの不純物をドーピングした場合について、光学利得、キャリア寿命などの基本パラメータを理論的に導出した。光学利得については、反転分布を生ずるキャリ

ア密度(利得ゼロのキャリア密度)をp型、n型とも低減できるが、とくにn型ではきわめて小さなキャリア密度で反転分布を生じさせることを見いだした。また、キャリア密度の増加に対する利得の増え方、いわゆる微分利得がp型では向上するが、n型では逆に低下する結果を得た。キャリア寿命については、p型、n型共低減するが、しきい電流密度を算出すると、実現可能な不純物密度として $10^{19}/\text{cm}^3$ 程度まででは、p型についてはやや増加し、n型については低減できることを見いだした。また、緩和振動周波数を算出すると、p型ドーピングを行った場合、微分利得の向上を反映して、活性層を従来のバルクとした場合に比べて4倍の向上が図れることを見いだした。以上の結果は、本論文により、初めて明らかにされたものであり、物性的にも興味深い内容を含んでいる。

論文IIでは、上記の理論解析に基づいて、GaAlAs多重量子井戸構造レーザー素子を試作した結果について述べている。分子線結晶成長法により、p型の不純物としてBeを用いた多重量子井戸構造のレーザー素子を試作した。変調ドーピング構造が実現できたことを確かめるために、高精度不純物プロファイル分析を行い、障壁層のみに不純物がドーピングされていることを確かめた。同時に、アンドーピング、および量子井戸全体に一樣に不純物をドーピングした構造の多重量子井戸レーザーも試作した。これらについて、緩和振動周波数を評価した結果、変調ドーピング構造においては、バルクの活性層の場合の5倍の向上、およびアンドーピング多重量子井戸活性層の場合の2.5倍の向上を確認した。これは上記の理論計算結果とほぼ一致する。これより、緩和振動周波数として、通常の共振器長のレーザーとして、世界最高の30GHzを実現した。同時に、一樣ドーピングの多重量子井戸構造についても緩和振動周波数を評価したが、変調ドーピング構造とほぼ同様な値が得られた。従来、バルク活性層についてp型の高濃度ドーピングによる緩和振動周波数の向上が報告されているが、この機構がバンドテイルによるものではなく、過剰な多数キャリアによるものであることを初めて明らかにした。

以上述べたように、本論文は、新規な半導体レーザー構造の提案を行い、理論的、実験的に実証したオリジナリティの高い論文である。また本論文で提案した変調ド

ープ多重量子井戸構造は、半導体レーザーについて実用上重要な超高速化や、低しきい値化など特性の大幅な向上に貢献するものである。(日立中研 茅根直樹)

中村 収氏の論文紹介

中村収氏の受賞論文は下記のとおりである。

主論文：“Multispectral computed-tomography microscope for 3D material analysis,” *Appl. Opt.*, **29**, 1671-1674 (1990).

副論文：1) “Optical microscope tomography II, Nonnegative constraint by a gradient projection method,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **5**, 554-561 (1988). 2) “Optical microscope tomography I. Support constraint,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **4**, 292-297 (1987).

医学、生物学やバイオテクノロジーなどの諸分野において、微小な細胞の内部構造・状態の三次元分布を定量的に把握しうる手法の開発が、長年の課題となっていた。生きたまま、水分を含んだ状態で細胞を観察するには、光学顕微鏡がほとんど唯一の手段と考えられるが、光学顕微鏡は平面状物体の観察を目的に作られたものであり、厚みのある試料の内部構造を定量計測するものではない。したがって、光学顕微鏡で細胞の内部構造を定量計測するには、細胞を薄くスライスして観察するほかに手段はない。しかしこの方法では、細胞を物理的に破壊してしまうことになるので、これまで、細胞内の生命機能を維持したままの観察は不可能であったと言える。

中村収氏の一連の論文は、この光学顕微鏡の本質的な欠点の解決につながるものであり、臨床医学で有名なCT (computed tomography) 手法を、光学顕微鏡下で実現するための新しい計測原理の提案、装置の開発、および多くの検証実験に関する内容からなっている。

微小な細胞に対してCTを実現するには、その装置構成に工夫が必要である。対物レンズと試料の間には試料を360度回転させるだけのスペースはない。論文では、偏斜照明・結像系とコンピュータによる再生アルゴリズムを組み合わせたという全く新しい原理により、巧みに微小光CTを実現する手法を提案するとともに、通常の透過型光学顕微鏡を基本にしたシステムの試作について述べ、これを光CT顕微鏡と名付けている。さらに、実際に本顕微鏡を幾つかの生体細胞測定に適用し、その三次元再生性能を実証している。

試作初期の光CT顕微鏡では、対物レンズの開口数で決まる観察角度範囲の制限から、奥行き分解能が十分に

はなかった。そこで、物質密度の非負値性という物理的先験情報を拘束条件として三次元再構成アルゴリズムに導入し、実際に光CT顕微鏡の奥行き分解能が3倍向上することを示している。

主論文は、光CT顕微鏡の、分光学に基づいた分析応用に関するものである。試料中に複数物質が複雑に混在しているとき、それらの物質の三次元分布を別々に再生できれば、組織内の状態を把握したり病理学的な診断を行うのに有用である。物質は固有の光吸収スペクトルを持っているので、混合物試料の投影像を複数波長で観察すれば物質分布の分離を三次元空間で実現できる。そこで、測定した分光投影像から、それに含まれる複数物質の三次元分布を別々に再生する手法を開発し、2種の物質から構成されている試料の物質別三次元分布を実際に再生し、その有用性を示している。

さらに、光CT顕微鏡の実用機のプロトタイプとして、レーザーCT顕微鏡を試作している。レーザーCT顕微鏡では、光源に波長可変He-Neレーザーを用い、照明方向の走査に回転プリズムを採用することで、エネルギー効率の向上と照明方向の走査の高速化を実現している。初期の光CT顕微鏡に比べ、測定画像のSN比が向上し、実用的に分解能および画質の向上が達成されている。

これらの一連の研究は、最近の新しい光学顕微鏡やその応用に関する研究ブームのきっかけとなり、広範囲にインパクトを与えている。受賞論文で報告された多くの実験や原理解析の結果は、光を用いたマイクロアナリシスに関する研究の今後の指針となるであろう。

中村収氏は、1984年大阪大学工学部応用物理科を卒業後、同大学院応用物理学専攻博士前期および博士後期課程を修了している。受賞対象となった研究は、同氏の学位論文の前半部分をさらに進めたものである。

氏は、現在、通産省工業技術院計量研究所の研究員として、光CT顕微鏡のほかに、空間における精密位置決め技術、レーザー顕微鏡の応用などの研究を行っている。今後も、持ち前の創造力と緻密な解析力を十二分に発揮し、光応用計測の分野でのますますの活躍を期待したい。(阪大工 南 茂夫)