解 説

半導体発光素子の研究開発動向

米津宏雄*

Trend of Research and Development for Semiconductor Light Emitting Devices

Hiroo Yonezu

Synopsis

This paper reviews present states and future trends of research and development of semiconductor light emitting devices of LDs and LEDs, including optoelectronic applications. The trends are lower threshold current, higher optical power, shorter wavelength and novel operation in OEICs. Quantum well structures are essential for low current operation required in OEIC. Atomically controlled heteroepitaxy and fine pattern processing are required for realizing the quantum wire and quantum box. Total high technologies of heteroepitaxy and processing lead to high power density operation. Possible materials for short-wavelength-light of blue and green are presented including II-VI compound semiconductors. A large optoelectronic field would appear after realization of combination of compound semiconductors and Si. The basic common technology for these research and development is heteroepitaxy in which growth mechanisms should be studied in atomic level.

1. 光エレクトロニクスの概要

半導体レーザの室温連続発振が1970年に達成されてから20年強の間に、光エレクトロニクスといわれる新しい世界が開けた。光通信、光情報処理及び光計測はその代表例である。これらはエレクトロニクスだけでは実現し得ない卓越した能力を有するシステム及び機器である(図1)。そこでのキー・デバイスは半導体レーザ、発光ダイオード及び受光ダイオードなどの光デバイスである。

光通信は中継間隔を長くとれるために、国内や

欧米諸国の陸上通信網だけでなく、国際海底中継通信にも実用化され、我々は遅れの少ない国際電話の恩恵を受けている。高速・大容量化の流れはなお続き、1Gb/s 台から10Gb/s を超す領域に入ろうと研究開発は進められている。一方では、ISDNに見られるように家庭への光通信化が進もうとしている。

光情報処理では、高速のレーザプリンタ、高密度記録の光ディスクメモリ、バーコードリーダなどの高性能な情報端末機器が情報化社会に大きく貢献している。また、超高速・並列演算を目指した光コンピューティングの基礎研究も進められている。さらに、超高輝度発光ダイオード(LED)の開発によって、各種のディスプレイは近年めざ

1992年6月16日受付

*豊橋技術科学大学工学部教授、工博

図1 光エレクトロニクスの構成

ましい発展を続けている。青色の高輝度LEDが開発されればフルカラーが可能になることからその研究開発に長年の期待がかけられている。

民生用では、針式レコードを一新してしまったCDや、ビデオディスク、リモコンなどとして光デバイスは家庭に広く入り込んでいる。

図1に示されているように、光デバイスをキー・デバイスとしたシステム・機器は今後一層広がりを見せられると思われる。これらの光デバイスは、光学的な光技術に負うところも大きい、エピタキシー技術に極めて大きく依存している。

鉄と非鉄という言葉は半導体の世界にあてはめれば、シリコンと化合物半導体（非シリコン）ということになる。シリコンはLSIにその巨大な姿を見ることができる。しかし、間接遷移型の結晶材料であるから本質的に発光は難しい。

一方、GaAs, AlGaAs, InP, InGaAsP, GaInPなどの化合物半導体の多くは直接遷移型の結晶材料であるために、高い効率で発光が生ずる。これらの元素を自由に扱って、発光波長を制御するだけでなく、発光素子としてのチップ構造もエピタキシー技術で作ってしまう。最近では、原子層レベルで結晶の組成や原子の配列を制御する研究が

進んでいる。

以下に、光デバイスの代表である半導体レーザと発光ダイオードについて、その基礎となるエピタキシー技術に触れながら、研究開発状況と今後の技術動向について概説する。

2. 半導体レーザ

2.1 基本構造とレーザ発振波長

半導体レーザは電氣的には単なるダイオードであるために、レーザダイオード (LD: Laser Diode) と呼ばれる。バンドギャップの小さな薄い (約1000 Å) 活性層がバンドギャップの大きなクラッド層に挟まれ、クラッド層の一方がn形、他方がp形になって、ダイオードを構成している (図2(a))¹⁾。この構造はダブルヘテロ構造といわれ、高効率の発光を得るための最も基本的な構造である。すなわち、順方向バイアス下でn形クラッド層から注入された電子とp形クラッド層から注入されたホールが活性層に閉じ込められる。電流密度を上げると、活性層の電子とホールの密度は上がり、誘導放出、すなわち光波の増幅が生ずる。活性層の屈折率がクラッド層の屈折率より高いために光波も活性層に閉じ込められる。したがって、

図2 ダブルヘテロ構造と量子井戸構造

図3 一次元、二次元及び三次元の量子井戸構造（超格子）と電子のエネルギー状態密度²⁾

一対の反射面を構成すれば、誘導放出の利得が共振器損失に打ち勝つ電流でレーザ発振が生ずる。レーザ発振に必要な電流密度（しきい電流密度）は室温直流で数 kA/cm^2 であり、電流にして通常 $40 \sim 50 \text{mA}$ である。

レーザ発振波長 λ_0 はほぼ活性層のバンドギャップ E_g で決まる ($\lambda_0 [\mu\text{m}] = 1.24/E_g [\text{eV}]$)。すなわち、レーザ発振波長は活性層の結晶材料で決まる。表1に主な結晶材料とレーザ発振波長が示されている¹⁾。黒く塗りつぶされたところがこ

れまでに室温連続発振が達成された波長である。

2.2 低しきい電流化

しきい電流密度を下げるために活性層を $100 \text{\AA}$ 弱に薄くした構造は量子井戸構造といわれる（図2(b), (図3(a))²⁾。この薄い量子井戸層では光を閉じ込めることができないため、その外側に光波閉じ込め用の導波層を設ける。これによって、しきい電流密度は約1桁下がり、しきい電流 I_{th} は数 mA に下がる。これまでに 1mA を切るしきい電流が報告されている³⁾。

表1 ダブルヘテロ構造及び量子井戸構造のレーザ結晶と発振波長

■ 室温連続発振
□ パルス発振または低温連続発振
□ 推定レーザ発振可能領域

厚さ(x 方向)を薄くするだけでなく、 y 方向にも薄くした量子細線(図3(b))では、さらにしきい電流密度が下がることが理論的に予測されている⁴⁾。電子ビーム露光などの微細加工技術に加えて、各種のエピタキシャル成長技術が世界的に試みられている。理論値より大きい $I_{th}=3\text{mA}$ が報告されている⁵⁾。

さらに、 z 方向も薄くした量子箱(図3(c))では、さらにしきい電流が下がることが理論的に予測されている。やはり、微細加工技術とエピタキシャル技術を組み合わせるこの構造の実現が試みられている。しかし、製作技術が難しいため、レーザとしての実験結果はまだ報告されていない。

このように、ダブルヘテロ構造から量子井戸構造にし、さらに量子化の次元を上げていくと、しきい電流密度だけでなく、変調速度やスペクトル線幅などのレーザ特性が優れることが明らかにされている⁴⁾。図2(b)の量子井戸レーザは既に一部実用化されており、光通信や光情報処理あるいは光計測に必要不可欠である。

さらに、しきい電流を下げるために、量子箱の x, y, z の全方向に高反射率の共振器を構成する構造が提案されている⁶⁾。自然放出光が特定のモードに制御されるために、究極的には無しきい値レーザとなる。

2.3 高出力化

光出力密度を高くすることにより、光磁気ディスクの書き込み時間を短くしたり、レーザプリンタの印字速度を上げたり、光通信の中継間隔を伸ばすなどの機能の向上が得られる。

$0.7\mu\text{m}$ 帯波長のAlGaAsレーザや $0.6\mu\text{m}$ 帯波長のGaInPレーザでは、光出力密度を高くしていくと光学損傷が発生し、一瞬にして破壊する。これは反射面近傍の活性層が強いレーザ光を吸収して発熱し、溶融してしまう現象である。このため、量子井戸構造にして活性層を薄くし、光出力密度を下げると光学損傷が発生する臨界光出力が大きくなる。さらに、主光出力の取り出し面の反射率を下げて反対側の反射面の反射率を上げることによって、主光出力を大きくできる。

また、反射面近傍が吸収体になるのは、これらの結晶材料の表面物性に基づいた現象であるため、根本的に改善する試みも行われている。そこでは、反射面近傍をバンドギャップの大きな結晶

材料で構成してレーザ光の吸収を防ぐ。この種のレーザ構造はウィンドウ構造と呼ばれる⁷⁾。これらの改良によって、AlGaAsレーザでは基本横モード発振でCW光出力100~200mWの長期安定動作が近年報告されている⁸⁾。

光学損傷が同様に発生するGaInPレーザでは、伝導帯のヘテロ障壁の高さが低いために、活性層の電子がオーバーフローしやすく、高温での高出力動作がAlGaAsレーザに比べて難しい。

一方、光通信に主に用いられるInGaAsPレーザでは明白な光学損傷は報告されていない。これはこの結晶材料の表面再結合速度が遅いためである。したがって、ウィンドウ構造のような特殊な工夫なしに基本横モード発振でCW光出力100~200mWの長期安定動作が得られる。

なお、発振領域幅を広げたレーザでは、横モードは多モードになってレーザ光の品質は悪くなるが、発振領域幅が広がった分だけ光出力を大きくすることができる。この場合、量子井戸の厚さに対して高い均一度が求められる。この種のレーザでは1チップで1~3WのCW光出力が得られており、固体YAGレーザの励起光源などに用いられる。

このような改良努力が積み重ねられて、光出力は着実に高くなっていくと考えられる。ここでも、薄い均一な量子井戸層を得るためのエピタキシー技術が必須である。

2.4 短波長化

一般に、活性層に転位などの非発光性結晶欠陥を導入しないために、活性層とクラッド層、または量子井戸層と導波層の格子定数は基板と一致(格子整合)している必要がある。このため、図4からわかるように、波長 $1.3\mu\text{m}$ 及び $1.55\mu\text{m}$ の光通信用にはInP基板上にInGaAsP活性層とInPクラッド層がエピタキシャル成長される⁹⁾。波長 $0.78\mu\text{m}$ のCD用や光磁気ディスク用にはGaAs基板上にAlGaAsの活性層とクラッド層がエピタキシャル成長される。また、波長 $0.65\mu\text{m}$ のバーコードリーダーや各種の可視光用途にはGaAs基板上にGaInP活性層とAlGaInPクラッド層がエピタキシャル成長される。

ところで、緑色、青色、紫外光といったより短波長のレーザでは、より小さなスポットによる高密度の光ディスクメモリや化学反応への応用など

図4 半導体結晶の格子定数とバンドギャップ¹⁾

が可能となり、その用途は広い。しかし、図4からわかるように、これらの波長に対しては該当する閃亜鉛鉱型のIII-V族化合物半導体はない。青色と緑色の候補としては、ZnCdSe系やZnSeTe系のII-VI族化合物半導体とGaInN系のウルツ鉱型のIII-V族化合物半導体が挙げられる。これらの結晶材料に対しては、格子整合する基板が存在しない。このため、II-VI族化合物半導体のエピタキシャル成長にはIII-V族化合物半導体基板

が用いられることが多い。

ところで、量子井戸のような薄さになると、0.1%以下の格子定数の違い（格子不整合）があっても下地の結晶に横方向の格子定数を合わせ、縦方向に歪んでエピタキシャル成長する（図5(a)）。この成長層を厚くしていくと、歪が大きくなってついにはミスフィット転位が発生して格子が緩和する（図5(b)）。この格子緩和が始まるエピタキシャル層の厚さは臨界膜厚といわれる。すなわち、最

図5 格子緩和と臨界膜厚

近の原子層レベルで制御されたエピタキシー技術では、臨界膜厚以下で量子井戸層の厚さを制御できるため、結晶材料の選択に少し幅が広がってきた。

この技術を用いて ZnCdSe を量子井戸層とし、ZnSe を導波層とした量子井戸レーザで 77 K の青色 (4 900 Å) 連続発振が 1991 年に報告された⁹⁾。技術的改良によって室温連続発振が目標されている。

2.5 光電子集積回路

微小電流動作は、LSI 駆動が可能になるために、光回路と電子回路を一体化した光電子集積回路 (OEIC: Optoelectronic Integrated Circuit) には必須である。

チップ上面からレーザ光が放出される面発光レーザにはチップ内での配置を自由に行えるという利点がある¹⁰⁾。図 6 では、InGaAs 量子井戸層の上下に高い反射率を得るための分布反射器 (DBR: Distributed Bragg Reflector) が形成されている¹¹⁾。そこでは、AlAs/GaAs の屈折率がわずかに

異なる層が半波長の厚さで繰り返し多層エピタキシャル成長されている。薄い量子井戸のために上下方向の利得は小さいが、DBR によって 98% の高い反射率が得られるために、1 mA を切るしきい電流が得られる。

ところで、この例では InGaAs 量子井戸層の格子定数は GaAs/AlAs バリア層とわずかに異なるため、量子井戸層は歪を受けている。面発光レーザに限らず、このような歪を受けた量子井戸では価電子帯のバンド構造が変わるために、しきい電流密度が下がり、高い変調速度が期待される。このため、この種のレーザは歪量子井戸レーザと呼ばれる。

このような微小電流動作をする面発光レーザを 1 チップ内に二次元に多数配列すると、空間光並列光源や光配線ができる。これに、1 チップ内に二次元配列した量子井戸構造の受動演算素子 (SEED: Self-Electrooptic Device)¹²⁾ を対向させて、超高速・並列デジタル演算を行う試みがされている¹³⁾。

1 チップ内に電子回路とレーザを構成できれば、単に小形化できるだけでなく、配線によるインダクタンスが減るなどのために高速動作が容易になる。同じ化合物半導体結晶内に LD や LED あるいは受光素子と、FET や HBT を作った OEIC は光通信の送信器あるいは受信器としてすでに一部実用化されている (図 7(a))¹⁴⁾。空間光並列配線を用いた光電子ニューロコンピューティング用の OEIC では優れた機能が期待される (図

図6 InGaAs 歪量子井戸面発光レーザ¹¹⁾

(a) チップ断面構造

(ii) 回路

(i) 光送信用OEIC (CD+FET)¹⁴⁾

(光電子ニューロデバイス)

(b) 多層ニューラルネットワーク用OEICの構成概念図¹⁵⁾

図7 OEIC

7(b))¹⁵⁾。

本来の光子と電子の機能的特徴を組み合わせたり、大規模な電子回路と光回路を組み合わせる場合には、電子回路の設計・製造能力に優れたシリコンとの組み合わせが必要不可欠である。したがって、GaAsなどの化合物半導体とシリコンとのヘテロエピタキシーが必要である。格子定数を初め、諸々の物性が異なるために現時点ではデバイスレベルの良質なエピタキシャル層は得られていない。しかし、その必要度の高さから、新たなブレークスルーを目指して基礎研究が世界で進められている。

3. 発光ダイオード

3.1 動作原理と発光波長

発光ダイオードは、伝導帯に励起された電子が価電子帯のホールと再結合する際にエネルギーが

失われるが、その際光子が放出される現象を利用している。励起方法は半導体レーザと同様にpn接合に順方向電流を流す注入励起である。超高輝度LEDでは、活性層での電子-ホール対密度を上げるために、半導体レーザと同様にダブルヘテロ構造が用いられる。

発光波長はほぼバンドギャップに相当する光子エネルギーの波長である。したがって、伝導帯と価電子帯のバンド間遷移では、図4からわかるように、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ のAl組成比 x を変えて $0.6\mu\text{m}$ 帯波長の赤色から $0.8\mu\text{m}$ 帯波長の近赤外までカバーできる。しかし、閃亜鉛鉱型のIII-V族化合物半導体では最短波長はAlGaInPの黄色程度である。光通信には、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ のGa組成比 x とAs組成比 y を変えて $1.3\mu\text{m}$ 及び $1.55\mu\text{m}$ の波長が得られる。このような直接遷移型のバンド間遷移を用いるLEDではダブルヘテロ構造によ

って極めて高い輝度の発光が得られる。このため、直接遷移型のII-VI族化合物半導体による青色や緑色の高輝度LEDが期待されている。前述の青色レーザのZnCdSeやZnSeTe系が候補としてあげられる。

一方、不純物を導入すると固有のレベルがバンドギャップの中にできる(図8(a))。リモコン用の赤外LEDはその典型例で、GaAsにSiを多量ドーピングして、Siが作るレベルからの発光を利用する。また、ZnをドーピングしたGaPから青色発光が得られる。

間接遷移型結晶では、等電子トラップを介した発光や不純物に束縛された励起子の崩壊による発光を利用する。前者の典型例はNをドーピングしたGaPであり、緑色発光のLEDとして広く用いられている。後者の典型例はZn-OをドーピングしたGaPで、赤色発光のLEDとして用いられる(図8

(b), (c))。SiCによる青色LEDもその例である。これらの結果が表2にまとめられている¹⁶⁾。

3.2 高輝度化

発光ダイオードの光出力については、活性層の発光効率(内部量子効率)以外にチップの外へ光を取り出す、光取り出し効率が重要な因子になる¹⁾。直接遷移型のダブルヘテロ構造を有するLEDは、内部量子効率が高いだけでなく、クラッド層での光吸収がほとんどないために活性層からの光をチップ外に効率よく取り出し易い。

一般に、チップ上面(表面)から光を放出する場合、下面(裏面)へ向かう発光は散乱・吸収されて失われる。したがって、裏面の反射率を100%近くに上げると、表面からの光出力は2倍に上がる。これには裏面を鏡面研磨してその上にAuなどの金属蒸着膜をオーミック電極と兼ねて付ける方法¹⁷⁾と、面発光レーザに見られた多層半導体薄

図8 不純物を介した発光

図9 光取り出し効率の向上策

表2 発光ダイオード用結晶と発光波長¹⁰⁾

波 長 域		結 晶 材 料		発 光		結 晶 成 長		主 用 途
		発光層（活性層）	基板	中心波長 (nm)	遷移型	方 法	構 造	
赤 外 光	1 μm 帯	In _{0.85} Ga _{0.35} As _{0.79} P _{0.21}	InP	1 550	直接	LPE VPE	DH	光通信
		In _{0.76} Ga _{0.24} As _{0.55} P _{0.45}		1 300				
		In _{0.82} Ga _{0.18} As _{0.40} P _{0.60}		1 150				
	0.9μm 帯	GaAs(Si)	GaAs	940	直接	LPE	HM	リモコン
0.8μm 帯	GaAs	GaAs	870	直接	LPE	DH	光通信	
	Al _{0.03} Ga _{0.97} As		850					
Al _{0.15} Ga _{0.85} As	780		MOVPE					
可 視 光	赤	GaP(Zn-O)	GaP	700	間接 直接 直接	LPE	HM	ランプ, 表示 ランプ, 光通信 ランプ, 表示
		Al _{0.35} Ga _{0.65} As	GaAs	660		LPE	DH, SH	
		InGaP	GaAs	630~650		MOVPE	DH	
	橙 黄	GaAs _{0.25} P _{0.75} (N)	GaP	610	間接 間接 直接	VPE	HM	ランプ, 表示
		GaAs _{0.15} P _{0.85} (N)		590		VPE	HM	
		Al InGaP		570~610		MOVPE	DH	
	緑	GaP(N)	GaP	565	間接	LPE	HM	ランプ, 表示
		GaP		555				
青	GaN	Al ₂ O ₃	490	直接 間接	VPE LPE	MIS MIS	ランプ	
	SiC	SiC	480					

DH: ダブルヘテロ構造, SH: シングルヘテロ構造, HM: ホモ接合, MIS: MIS 構造

LPE: 液相成長, VPE: 気相成長, MOVPE: 有機金属気相成長法

膜による DBR をエピタキシャル成長時に作る方法¹⁰⁾とがある(図 9(a), (b))。後者は透過波長域や反射率を設計できることから, MOVPE や MBE で実現できる新しい基礎技術である。

一方, 光取り出し面(表面)の空気に対する全反射角は, AlGaAs の場合約 16 度と小さい。このため, 球面加工のような全反射角対策は光取り出し効率の向上に極めて有効である。(図 9(c))¹⁰⁾。

超高輝度 LED は, 半導体レーザが可能な直接遷移型結晶のダブルヘテロ構造に, 光取り出し効率を上げるための各種の工夫が施されて今日に至っている。したがって, 超高輝度 LED の研究開発は半導体レーザのそれと結晶材料面では不可分の関係にある。

3.3 高機能化

1Gb/s を超す高速光通信用の InGaAs PLED, 高光出力の空中伝搬光通信・計測用の AlGaAs LED, さらにスペクトル幅が極めて広い光ファイ

バ・ジャイロ用の LED などが, LED 単体の性能を上げた例としてあげられる。

これに対して, プリント用の LED の例では, 1 cm 前後の長いバー状のチップに 200~300 μm ピッチで多数の LED が配列される。ここでは, チップ内, チップ間の各 LED の光出力の均一化が強く要求される。このため, プロセスの均質化はもちろんであるが, エピタキシャル層の均質化が最も重要になる。また, LED プリントや光 LAN の例を見ても, LED の駆動回路は Si IC による。ここでも, 化合物半導体と Si の一体化エピタキシー技術は重要な将来技術である。

4. 今後の課題と展望

半導体レーザと発光ダイオードのいずれも, 青色, 緑色, さらに紫外光源といった, 短波長化のための結晶材料の研究は不可避である。フルカラー・ディスプレイを初めとして実現したあかつき

の産業的意義は極めて大きい。新結晶材料の研究には、MBEやMOVPEを用いた原子レベルのヘテロエピタキシャル成長機構の基礎研究が重要である。

一方、発光素子の高機能化という観点からは、光通信用のOEICは実用的見地から着実に進展していくであろう。量子細線や量子箱、あるいは無しき値レーザなどの微小電流動作は新しい光情報処理の分野を切り拓く鍵として期待されている。これと併せて光の放射角を自在に制御するなどの光制御技術もチップ内に組み込む必要がある。これらはいずれも微細加工技術の必要性を示している。

さらに広い光電子分野を切り拓く基盤技術として、化合物半導体とSiの一体化という課題がある。そこで得られる基礎的な結果はヘテロエピタキシー全般にかかわる重要な物理的機構を意味しており、新たな応用への基盤になると考えられる。

これらの研究開発をとおして、真に電子技術と光技術が融合した光エレクトロニクスの世界が今後開かれていくものと思われる。

(文 献)

- 1) 米津：光通信素子工学—発光・受光素子— (1984) [工学図書]
- 2) 日本物理学会編：半導体超格子の物理と応用 (1984) [培風館]
- 3) T.R.Chen, B.Zhao, Y.H.Zhuang and A. Yariv: Appl. Phys. Lett., **60** (1992), 1782
- 4) 浅田：応用物理, **57** (1988), 702
- 5) S.Simhony, E.Kapon, E.Colas, R.Bhat, N.G. Stoffel and D.M.Hwang: IEEE Photon. Lett., **2** (1990), 305
- 6) 山本, 上田：電子情報通信学会誌, **72** (1989), 1014
- 7) H.Yonezu, M.Ueno, T.Kamejima and I. Hayashi: IEEE J. Quantum Electron., QE-15 (1979), 775
- 8) E.Latta, A.Moser, A.Oosenbrug, M. Gasser and Th.Forster: 12th IEEE Int. Semicon. Laser Conf., Conf. Digest, Q-4 (1990), 276
- 9) M.A.Haase, J.Qiu, J.M.Depuydt and H. Cheng: Appl. Phys. Lett., **59** (1991), 1272
- 10) F.Koyama, S.Kinoshita and K.Iga: Appl. Phys. Lett., **55** (1989), 221
- 11) R.S.Geels and L.A.Coldren: 12th IEEE Int. Semicon. Laser Conf., Conf. Digest. B-1 (1990), 16
- 12) D.A.B.Miller, D.S.Chemla, T.C.Damen, T. H.Wood, C.A.Burrus, Jr., A.C.Gossard and W.Wiegmann: IEEE J.Quantum Electron., QE-21(1985), 1462
- 13) A.Huang: 1990 Int. Topical Meeting on Optical Computing, Conf. Record, 10F2 (1990), 259
- 14) 鈴木, 伊東, 井元, 寺門, 笠原, 麻埜, 崎, 清水, 藤田：信学技報, OQE87-184 (1988), 59
- 15) 米津：電子情報通信学会誌, **75** (1992), 350
- 16) (財)光産業技術振興協会監修：光部品・製品活用事典(1985)
- 17) S.Yamakoshi, M.Abe, O.Wada, S.Komiya and T.Sakurai: IEEE J.Quantum Electron., QE-17(1981), 167
- 18) T.Kato, H.Susawa, M.Hirotani, T.Saka, Y. Ohashi, E.Shichi and S.Shibata: J. Cryst. Growth, **107** (1991), 832
- 19) K.Kurata, Y.Ono, K.Ito, M.Mori and W. Susaki: IEEE Trans. Electron Devices, ED-28(1981), 374