

TR-O-0091

34

ワニエ・シュタルク局在効果を利用した
半導体光素子、WSL-SEEDの動特性解析 [I]

細田	誠	川島	健児
富永	浩司	渡辺	敏英

1996. 1.17

ATR光電波通信研究所

ワニエ・シュタルク局在効果を利用した半導体光素子,WSL-SEEDの動特性解析 [I]
非線形電気回路、S-SEEDのポテンシャル関数法による動特性解析：
準安定状態を経由した3状態間遷移および光トランジスターの実現

ATR光電波通信研究所

細田 誠, 川島 健児, 富永 浩司, 渡辺 敏英

概要

本報告では、非線形電界吸収効果を利用したSelf-Electro-optic Effect Device (SEED)素子を直列に接続したS-SEED(Symmetric-SEED)構成における非線形電気回路の動特性を、新しく開発されたポテンシャル法を用いて統一的に解釈できることが述べられている。このポテンシャル関数法はS-SEED回路の他に、R-SEED等の他のSEED回路構成のみならず、種々の非線形な電界吸収効果を有する電気回路として見られる半導体光変調器や半導体レーザーダイオード等の動特性解析にも利用できる可能性を有している。このポテンシャル関数法により、SEEDにおける電気回路的な動特性は初めて総てあきらかとなった。

また、ワニエ・シュタルク局在効果を利用したSEED素子に特徴的な、双安定ヒステリシス特性中の通常のDC光入力では到達できない孤立した準安定状態が初めて発見され、それを利用した多状態間の光スイッチングについて、上記ポテンシャル関数法を利用した動特性解析によって解明することができた。

上記に加え、WSL-SEEDにおける多峰性負性抵抗領域を利用すると全光型3端子アナログトランジスターを実現できることが初めて発見され、このようなゲインを有する光トランジスターの実現もWSL-SEEDならではの多機能性であり、本報告においては動作原理の解析およびゲインを増すにはどのようにすればよいのかが解説されている。

なお、本報告の作成においては、第1章～4章と第5章の第1節を細田が、第5章の第2節以降を富永が担当した。

目次

第1章	はじめに	4
第2章	ワニエ、シュタルク局在効果型、自己電気光学効果素子 (WSL-SEED) の概要および動作原理の基礎	5
第3章	ポテンシャル法による大域的安定性解析	7
3-1	系の運動方程式からのポテンシャル関数の定義	7
3-2	双安定S-SEEDに対する適用例	8
3-3	S-SEEDにおける多重安定性の解析	10
第4章	準安定状態を利用した3状態間遷移とその解析	14
4-1	準安定状態の観測	14
4-2	準安定状態への遷移に関するポテンシャル法を用いた解析	14
第5章	全光型アナログトランジスタの実現とその動作原理	19
5-1	ポテンシャル関数法からの予測	19
5-2	全光型トランジスタの実現	23
第6章	まとめ	30
参考文献		30

非線形電界吸収効果を利用したSelf-Electro-optic Effect Device (SEED) 素子^{1),2)}は小型集積化可能、高感度、低スイッチング・パワーという特徴を持ち、全光型データ処理システムにおける主要素たる、ロジック・ゲート、ラッチ、メモリー等に使用されてゆく潜在能力を有している。その動作の基となっているのは電界吸収効果として知られている現象である。電界吸収効果としては、量子井戸中のエキシトン準位のシュタルク・シフトを使用したQCSE効果 (Quantum Confined Stark Effect)³⁾がよく知られているが、我々は薄いバリアーによる短周期超格子中に生じる電子のミニバンドが、電界によって各量子井戸の個別のサブバンド準位に戻るワニエ・シュタルク局在効果⁴⁾⁻⁶⁾ (Wannier Stark Localization effect) を利用してSEED素子を実現し(WSL-SEED)、それらの特性、及び物性を研究している。WSL-SEEDにおいては以下に述べるように種々の多機能な動作が可能であり、本報告においてはそれらの動特性を新しく開発されたポテンシャル法⁷⁾⁻⁹⁾を用いて統一的に解釈できることが述べられる。

SEEDは通常、2個の同等のSEED素子を直列に接続したS-SEED (Symmetric-SEED) 構成²⁾で使用され、光双安定特性を示す。我々はこの双安定ヒステリシス特性中に通常のDC光入力では到達できない孤立した準安定状態を発見し、それを利用した多状態間の光スイッチングを実現した。¹⁰⁾⁻¹²⁾ 上記の準安定状態は通常のQCSE効果を利用したSEED素子では出現せず、ワニエ・シュタルク局在効果を利用したSEED素子に特徴的なものである。このような多状態間のスイッチング特性を利用することにより、単に単純な1個のS-SEED構成を利用しただけで、光多値論理ゲートや双方向カウンターが実現可能である。

上記に加え、WSL-SEEDにおける多峰性負性抵抗領域を利用すると全光型3端子アナログトランジスターを実現できることが初めて発見された。^{13),14)} このようなゲインを有する光トランジスターの実現もWSL-SEEDならではの多機能性であり、本報告においては動作原理の解析およびゲインを増すにはどのようにすればよいのかが解説されている。

非線形電界吸収効果を有する電気回路としてS-SEED回路を見た場合、これまでの解析法では定性的な光電流の非線形に基づく局所的安定性解析しか報告されていなかった。この方法では静的な動作解析にしか通用せず、時間的に安定点から外れて行く動特性の解析は困難であった。これに対し、我々によって新しく提案された上記ポテンシャル関数法を用いることにより安定点から外れた時間的動きも完全に扱えるようになり、動特性上の解析が可能となった。このポテンシャル関数法はS-SEED回路の他に、種々の非線形電界吸収効果を有する電気回路として見られる半導体光変調器や半導体レーザーダイオード等の動特性解析にも使用できる可能性を有しているが、本報告では紙面の関係からS-SEED回路のみに限って話を進める。すなわち、このポテンシャル関数法により、SEEDにおける電気回路的な動特性は総てあきらかとなり⁹⁾、SEEDの時間応答特性においてun-knownであるものは半導体超格子内におけるキャリア輸送の問題が残るだけとなった。

第2章 ワニエ・シュタルク局在効果型、自己電気光学効果素子 (WSL-SEED) の概要 および動作原理の基礎

後の解説を容易にするために、まず、WSL-SEEDの非線形電界吸収効果について概説する。なお、その詳細については参考文献、15~19を参照されたい。ワニエ・シュタルク局在効果（以後、WSL効果と略。）による電界吸収効果はQCSE効果によるものとは、その電界吸収効果の成因が大きく異なっている。^{3),5),6)} 図1に示すようにQCSEではバリア幅の厚い孤立した量子井戸の集合を用い、量子井戸中に閉じ込められたサブバンドにおけるエキシトンのシュタルク・シフトによるエキシトン・ピークのずれを印加電界によって生じさせる。これにより、図2に示すように光吸収端はレッド・シフトする。通常、光変調器ではこのずれた吸収端を利用するが、それと異なり、SEEDにおいては負性抵抗によって正帰還をかけて双安定特性を出すために、図2に示したような印加電界が弱くなった時に光吸収が増すといった波長でこのQCSE効果を利用する。以上のQCSE効果とは異なり、WSL効果においてはバリア幅の薄い量子井戸（結合量子井戸）の集合を用い、各、量子井戸中の互いのサブバンド・レベル間のトンネリングの干渉によるフェルミ粒子統計を持つ電子のパウリの排他律から、全体としてミニバンドと呼ばれるバンドができる。印加電界がない場合、光吸収は図1のようにこのバンド内の最低エネルギー準位集団に属する励起子によって起こり、単一の孤立した量子井戸のサブバンド・レベルよりも低いエネルギー（長波長側）で吸収端が生じる。電界をある程度かけると、各量子井戸のサブバンド・エネルギーは図1のように干渉しなくなるため、ミニバンドは破れて、もとの単一量子井戸のサブレベルに戻る。その時、波動関数は超格子全体に渡ってバンド中に分布していたものが、各量子井戸中へ局在していく。すなわち、これをワニエ・シュタルク・局在^{5),6)}と呼ぶ。以上の物理的な原因により、WSL効果の場合は電界によってブルー・シフトが起こり、図2に示すように吸収端は短波長側にシフトする。

またWSL効果においては薄いバリアを使用しているため、サブバンド準位に分裂した後も各量子井戸内の各々の波動関数は図3に示すようにトンネリングによって近傍の量子井戸中へしみだしている。これらの準位はeFD（e:電子の単位電荷、F:電界強度、

D:超格子の基本周期）の等間隔をもった階段状の準位、シュタルク階段準位⁴⁾を形成する。これらの波動関数のしみだしに対し、下のホール準位（ヘビーホールは有効質量が重く、ほとんどトンネルせず井戸中に局在する。）から遷移が生じるため、エネルギーの低い側（ex. $n=-1, -2$ etc.）にも光吸収が生じる。従って特に非常に薄いバリアを用いた場合、各次数のシュタルク階段準位の吸収ピークが印加電界によって吸収波長を移動して現われるため、フォトカレントの波長依存性は印加電圧に対し複雑な変化を示すようになる。¹⁶⁾ このような超格子をpinダイオード構造中のi層に埋め込んでSEEDを作製した場合、入射波長を適度を選択すると、これらの各n次のシュタルク階段ピークが印加電圧によって次々とその波長を横切っていくため、多峰的i-Vカーブを示すSEED素子を得ることもできる。^{16),17),19)} このように複数のピークをi-V特性に持つということは、すなわち複数の負性抵抗領域を持っているということであり、単峰的i-Vカーブを持つQCSE型と異なり、WSL-SEEDにおいてはこれまで種々のバラエティーに富んだSEED動作が実証されてきた。^{18),19)}

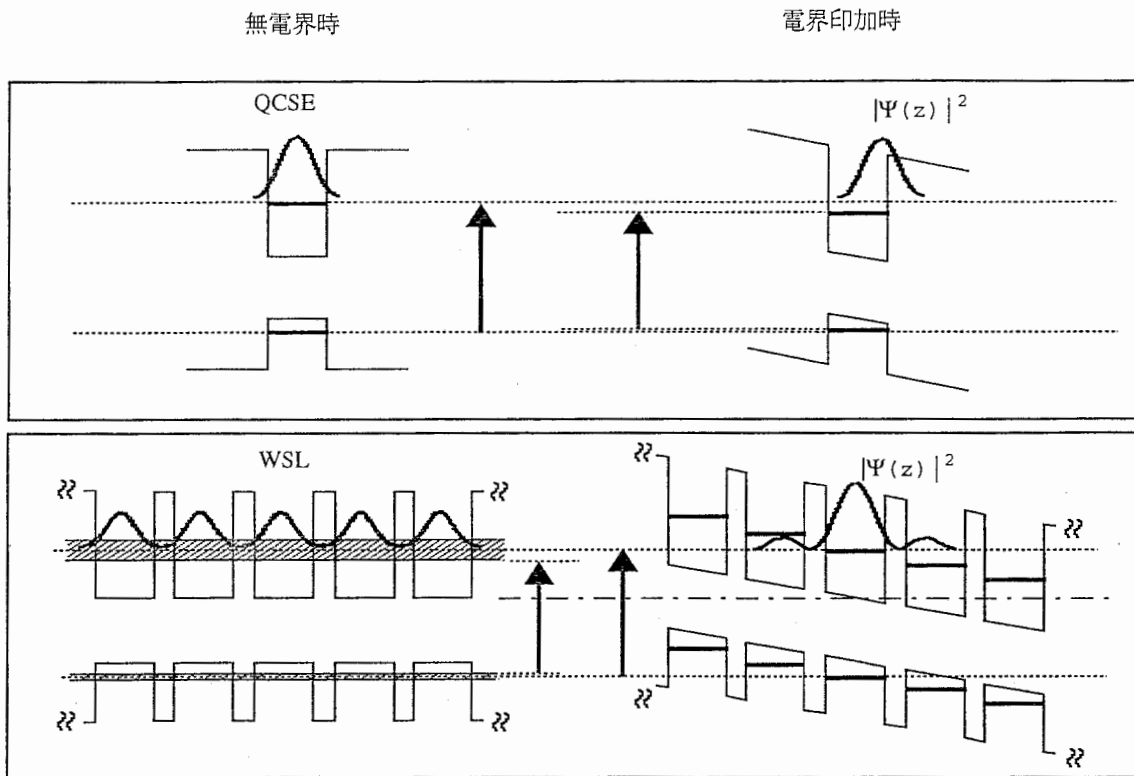


図1 電界吸収効果の成因

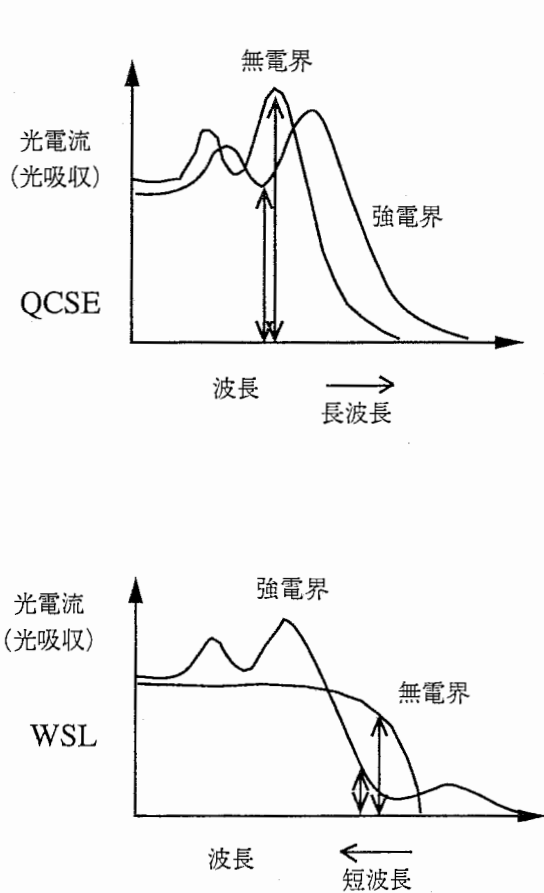


図2 電界吸収効果の差

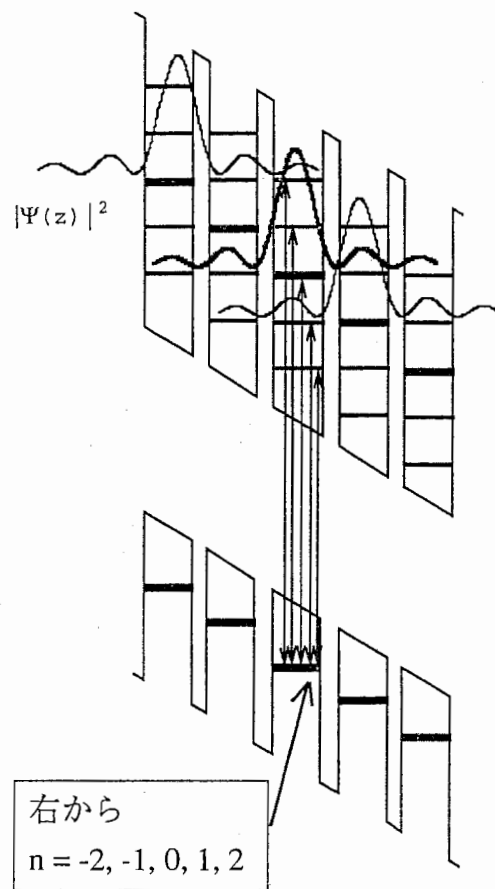


図3 シュタルク階段準位

第3章 ポテンシャル法による大域的安定性解析

以上述べてきたような*i-V*特性を持つSEED素子をS-SEED接続とした場合について、微分方程式の安定性理論^{20),21)}を用いて解析することにより、そのスイッチング動作を容易に視覚的に説明できる。

3-1 系の運動方程式からのポテンシャル関数の定義

図4に示すS-SEED接続において、各々のSEEDの電流バランスを考えることにより、以下の微分方程式を得る。

$$Pc1(V_0 - V) + \frac{dQ_1}{dt} = Pc2(V) + \frac{dQ_2}{dt} \quad (1)$$

($Pc1, Pc2$ = SEED のフォトカレント、 $Q1, Q2$ = SEED素子の容量, $C/2$ に溜まっている電荷。)

従って、SEEDダイオード、 $D1, D2$ の midpoint の電圧 V の時間変化は

$$\therefore Pc1(V_0 - V) + \frac{C}{2} \frac{d(V_0 - V)}{dt} = Pc2(V) + \frac{C}{2} \frac{dV}{dt} ,$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} [Pc1(V_0 - V) - Pc2(V)] \equiv \frac{1}{C} \Delta Pc(V) \quad (2)$$

局所的な V の変化は例えば 1 次近似として $\Delta Pc(V)$ を v_0 近傍でマクローリン展開して

$$V = V_x + \delta V, \quad \frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} \left. \frac{\partial \Delta Pc}{\partial V} \right|_{V_x} \delta V .$$

係数を α と置くと、

$$\alpha \equiv \frac{1}{C} \left. \frac{\partial \Delta Pc}{\partial V} \right|_{V_x} ,$$

$$\frac{dV}{dt} = \alpha \delta V .$$

従って、 $\delta V \propto e^{\alpha t}$

となって、 $\frac{\partial \Delta P_c}{\partial V}$ の符号により、局所的な時間的安定、不安定が決まる。²²⁾ところが、これだとVがどちらの方向に動くのかは見分けにくい。また、安定点近傍からはずれた場合に運動を解析できなくなってくる。従って、以下に述べる大域的安定性理論のほうが見通しがつきやすい。

Vの時間変化を運動方程式とみなし、あるポテンシャル関数によって記述できると仮定する。(または陽に記述できないときにはリヤプノフ関数によって囲み込む。)このようにすることにより、微分方程式の大域的安定性やVの時間変化はポテンシャル関数Uの形状の解析に帰結する。²¹⁾すなわち、

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\partial U}{\partial V} = -\frac{1}{C} [Pc2(V) - Pc1(V_0 - V)] \quad (3)$$

より、

$$U(V) = \frac{1}{C} \int_0^V [Pc2(V') - Pc1(V_0 - V')] dV' \quad (4)$$

というポテンシャル関数が求まり、この形状を見れば安定点が一目で分かり、今、非安定点にある点がどちらに動くのかがすぐ分かる。すなわち、ポテンシャル関数上のより低位の位置、極小点である谷へ向けて系は運動して行く。これは通常の力学系におけるポテンシャルの場合と同じでわかりやすい。また、上記方法は総ての電圧点での運動を大域的に記述できる。

3-2 双安定S-SEEDに対する適用例⁷⁾

以上より、(4)式を実際のSEEDのi-Vカーブに即して数値積分によりU(V)を求め、その極小値をとるVを見つければS-SEEDの安定点が分かり、そして不安定点からどちらの安定点に移動するかも分かる。この例をまず一般的な、例えばQCSE型のように単峰的i-Vカーブを持つS-SEEDに関して示したのが図5である。(また、WSL-SEEDにおいてもバリアーが厚くなったためにトンネリングが弱くなってシュタルク階段準位遷移の影響がなくなってくるとQCSE型同様に単峰性のi-Vカーブとなる。) フォトカレント、Pc(V)の大きさは入射光強度に比例するので、図5では図4のSEEDダイオード1(D1)に一定強度の光を入れておき、ダイオード2(D2)に入射する光強度を変えていったときに負荷曲線図とそれに対応するポテンシャル曲線がどのように変化するかを模式的に示してある。この図において以下のことが分かる。(D1,D2の入射光強度を各々I1,I2とす

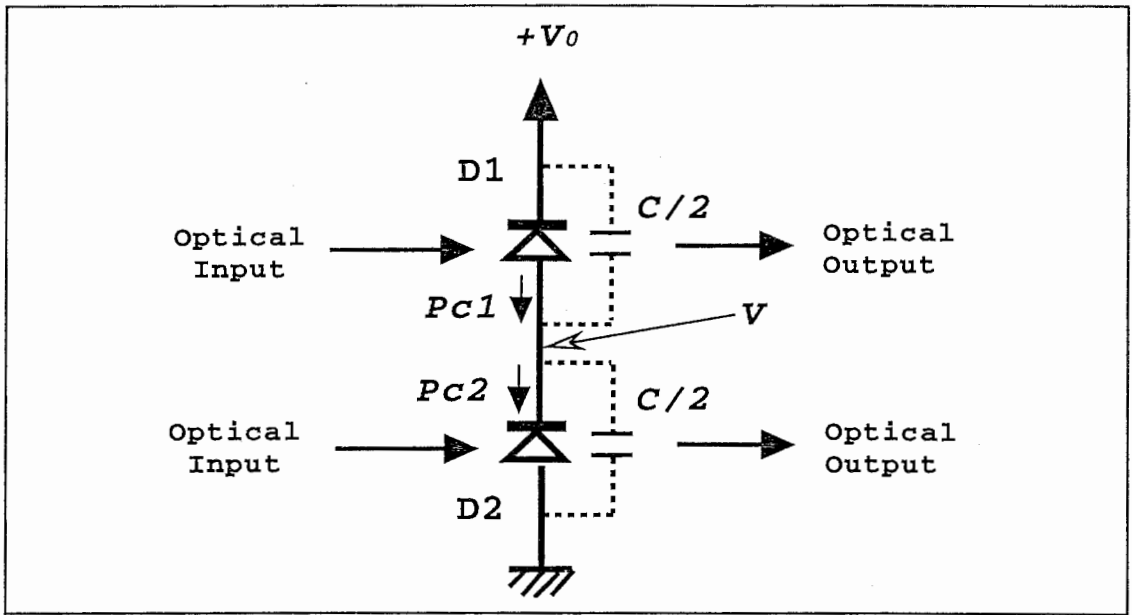


図4 S-SEED回路

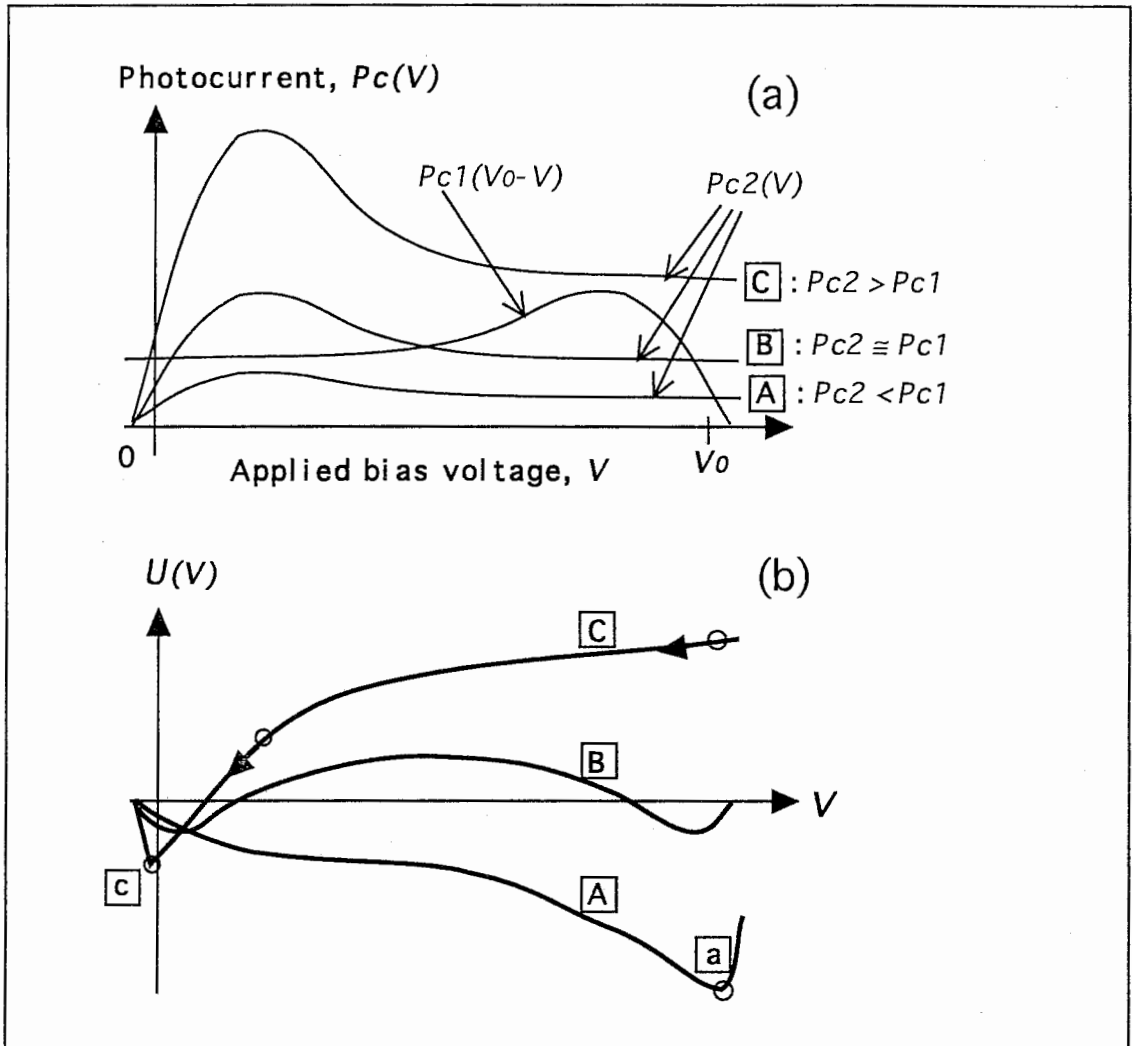


図5 双安定S-SEED回路における負荷曲線図 (a) とポテンシャル関数 (b)

る。)

1) $I_1 \gg I_2$ なる条件 (図5の"A") においてはポテンシャルの極小点は"a"点しかなく、S-SEED系はこの中点電圧配分、すなわち図4のVに対応、をもって止まっている。D2の光強度を条件"A","B","C"の順で増していくと、ポテンシャル関数は変形していき、"C"の状態では"a"点は不安定点となり、分配電圧,Vは新しい極小点,"c"に移動する。

2) 上記(1)において、"a"から"c"にVが移動する速さ,dV/dtは式(2)にあるように ΔP_c に比例し、Cに反比例する。その遷移時間は両ダイオードのフォトカレント差, ΔP_c の電流源で素子のコンデンサー,Cをチャージ/ディスチャージする時間となる。すなわち、系の応答時間(スイッチングタイム)は回路的には ΔP_c とCによって決まる。具体的には、入射する光強度の差が大きく、素子容量Cが小さければ応答時間は速くなる。(但し、上記は素子中の光キャリアー輸送時間をゼロとしたときの値であり、サブナノ秒以下スイッチング時間においては素子中を走るキャリアー輸送時間が無視できなくなってくる。またキャリアー輸送が阻害されると光吸収飽和が起こって、それ以上光入射強度を増しても ΔP_c が増加しなくなるが、その効果も無視している。これらの詳細については追って出るATR技術研究報告を参照されたい。)

3) 遷移中は過渡的に図5(a)の負荷曲線における $P_{c1}(V_0-V)$ と $P_c(V)$ は安定点に至るまで交差しない。これはD1とD2が直列接続されているため一見矛盾するように思えるが、じつは余剰の電流, ΔP_c は素子容量の充放電に使用されている。この充放電によって $V=Q/C$ により分配電圧が変化できる。極論すれば、S-SEEDシステムはデバイス容量があって初めて状態遷移、すなわちスイッチングが可能となっている。

4) 初期条件を"A"として、もしD2への光入射を"C"となるようにしてパルス状に一定時間入れた後、"B"の条件に戻した場合、"B"のポテンシャル障壁を越えていなければ分配電圧は"a"点へ戻ってしまう。反対に"C"の遷移中にVが、"B"に戻したときのポテンシャルの山を越えているまで移動していれば、"B"に戻した後も自動的に"c"の安定点に移動していく。すなわち、双安定特性を示している。

以上のようにポテンシャル関数を利用することによってS-SEED系の一番基本的な動作である双安定特性に対する系の運動が非常に容易に解析でき、かつ一目で分かるように視覚的に表現できる、という特徴があきらかとなる。

3-3 S-SEEDにおける多重安定性の解析

次に、多峰性のi-V特性を持ったSEEDによってS-SEED構成をとった場合には安定点が複数でてくる。図6-8にWSL型SEEDによるS-SEEDのi-V特性とポテンシャル関数の例を示す。図を見て分かるようにWSL型SEEDのi-V特性はその超格子のバリア幅等のパラメータによってシュタルク階段準位の影響の有る無しによって種々の特性を現出させることができる。^{9),17)} "α"は単峰特性でありバリアーの厚いWSL-SEEDの場合で、これまで説明してきたのと同じ双安定特性を示す。"β"は3重安定特性を示すものであり、光入力をDC的に変化させていくことにより、3つの安定点の間でスイッチすることは図7より明らかである。"γ"はDC的光入力に対しては双安定特性のみを示すが、前に説明したように、パルス光による励起によりポテンシャル関数,"C"の中途までVを遷移させた後、"B"の

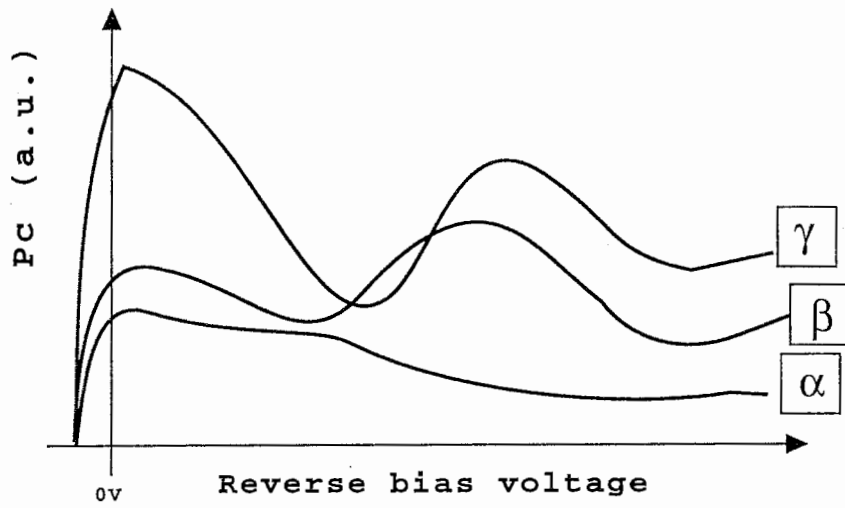


図6 種々の*i*-*V*特性例 (模式図)

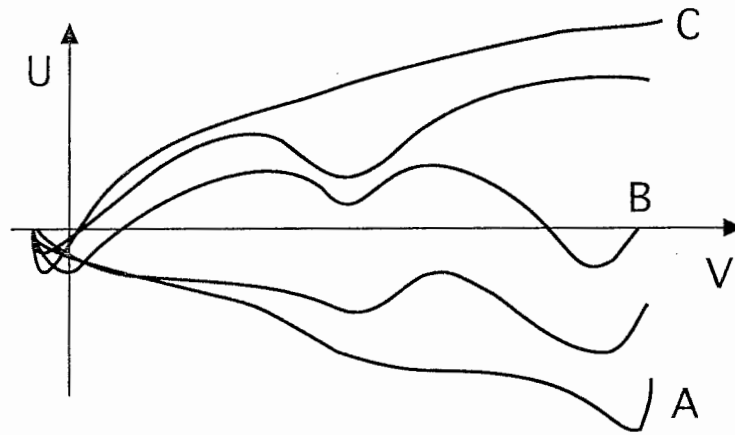


図7 三重安定 (図6β) のポテンシャル変化

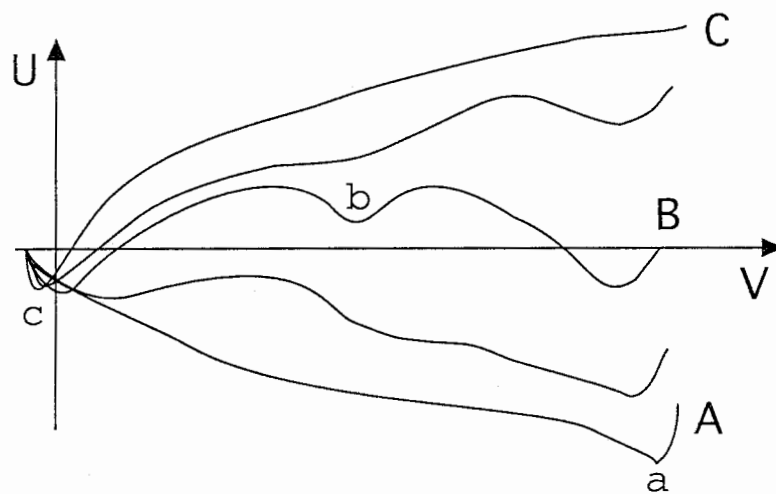


図8 準安定状態を経由する場合 (図6γ) のポテンシャル変化

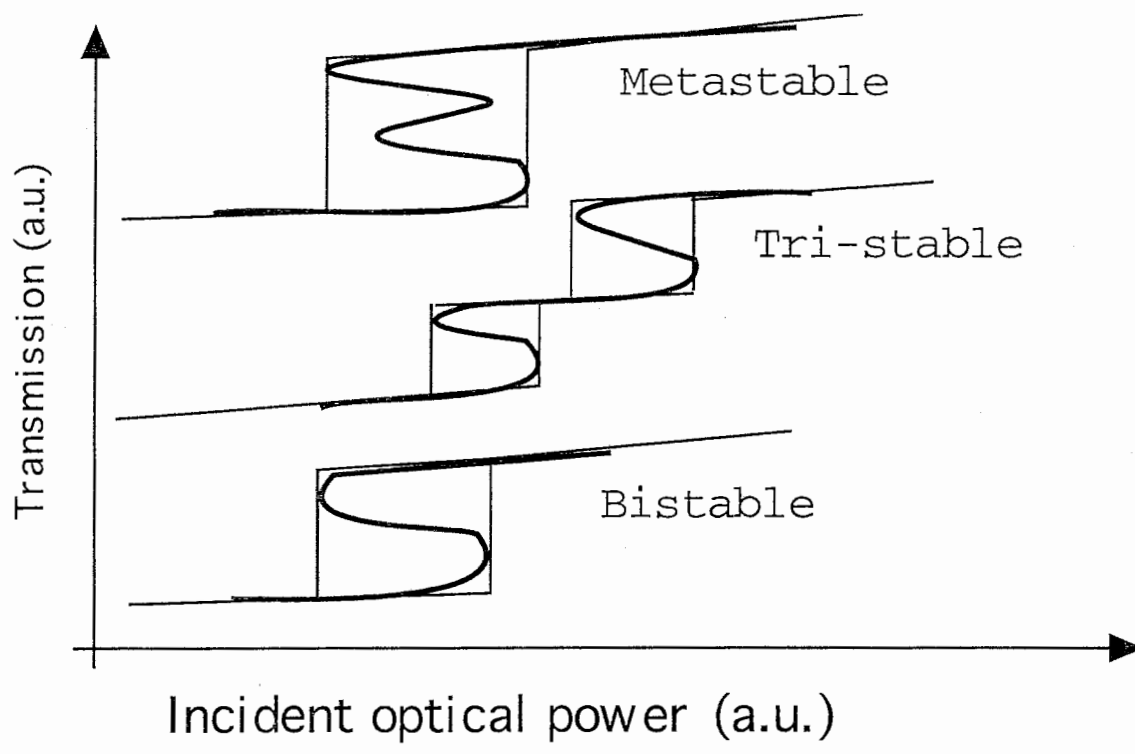


図9 種々のヒステリシス・カーブ (模式図)

状態に戻してやることにより、ポテンシャル関数,"B"上にのみ現われる極小点（準安定状態, Meta-stable state）にVを落とすことのできるものである。

このような準安定状態はある光強度における*i*-*V*特性にのみ現われ、DC的入射光の変化によっては到達できず、パルス光励起によってのみ到達可能な孤立した安定点であり、後述されるようにS-SEED系においては初めて観測されたものである。DC的光入力によって到達できないことは、スイッチング時の透過率（またはその逆の吸収率）のヒステリシス・カーブの形状においてもその差が明瞭に現われる。図9に模式的に示したヒステリシス・カーブにおいて、ヒステリシスの中に書いた太線は一種の折り畳まれた等ポテンシャル面、マニフォールド（多様体）を表わし、簡単なカタストロフィー理論的外観を与えている。"α"の双安定に関しては説明するまでもなく、与えられた光強度に対応する切辺に相当する透過率へ遷移が起こるため、突然に低透過率と高透過率間のジャンプが起こり、マニフォールドの形状より、双安定となる。"β"の三重安定に関しても同様である。ところが、"γ"のように真ん中の折り畳まれた部分がある場合、その上の折り畳みの傘よりも、はり出していない場合には、準静的すなわちDC的にゆっくりと遷移させた場合にはその中間の折り畳み点で止まらず、単に双安定特性が得られるのみであり、真ん中の折り畳みに相当する準安定点は準静的変化に対し孤立している。

4-1 準安定状態の観測

以上述べて来たように変わった性質を示す準安定状態を観測するためには、S-SEED構成において各々のSEEDダイオード、D1,D2にDCバイアス光を照射して図8のポテンシャル関数を"B"の状態としておき、D1,D2各々にパルス光を入力して一旦ポテンシャル関数の形を"A"または"C"に変え、分配電圧、Vの移動が準安定状態に対応するVになったときにパルス光を切ってポテンシャルを"B"の状態に戻してやればよい。以上により次のことが実現できる。

- 1) "a"の状態にリセットされたWSL-S-SEED系において、D2のSEEDに適度なパルス光を一つ入れると"b"の準安定状態に遷移する。もう一つ光パルスを入れると、"c"の状態に遷移する。
- 2) "c"の状態にセットされた系で、D1に一つパルスを入れるごとに"b","a"と逆方向にリセットされていく。
- 3) 一旦、"a"の状態に到達した後はリセットパルスを入れても変化しない。同様に"c"に対してもセットパルスでは"c"の状態を保つ。
- 4) 準安定状態にある時は光パルスが入らないかぎり時間的に安定である。

以上を実験によって示したのが図10である。また、図11には実際に使用したWSL-SEEDの*i*-*V*特性、及び図12にはそれから計算されたポテンシャル関数を、図13には実験系のセットアップを示す。図10中C1,C2はSEEDダイオードD1,D2への光パルス入射タイミングを示す。図より、準安定状態を経由したセット/リセット動作がきれいに起こっていることがわかる。ここで図11のinsetに注目されたい。この特性はパルス光なしでDC光強度をゆっくり変化させて得られた光スイッチング時の透過率のヒステリシス・カーブであり、前章の図8、図9の議論において予測されたように双安定特性を示しており、このS-SEED系においては準静的変化に対しては準安定点は安定点としては存在せず、系の変化から孤立していることを実験的に裏付けている。図11 inset中、A点、B点は負荷曲線の交点A,B点に対するヒステリシスカーブの対応点を示す。

4-2 準安定状態への遷移に関するポテンシャル法を用いた解析

従来用いられて来た負荷曲線によるスイッチング解析²⁹⁾においては、上記に示したように本S-SEED系は双安定性しか示さない。これに対し、図12にポテンシャル関数法による解法を示す。ダイオードD1に入射する光強度を図13にあるような実験系でパルス光の重量によって変化させた場合、図12においてD1への光強度が増すにつれ、光電流、 P_{c1} の強度も1,2,3と強くなってゆき、ポテンシャル関数も対応する1,2,3と変わってゆく。最初の安定点が0V付近の、図中左側の極小点にあるとすると、ポテンシャル関数3においてはその極小点が消え、系の運動は右側へと落ちて行く。 α に対応する電圧まで系が移動したとき、光パルス照射をやめてポテンシャルを3から1に戻してやれば、系はポテンシャル1の極小点である α 点、すなわち、準安定状態に静止する。再度、光パルス

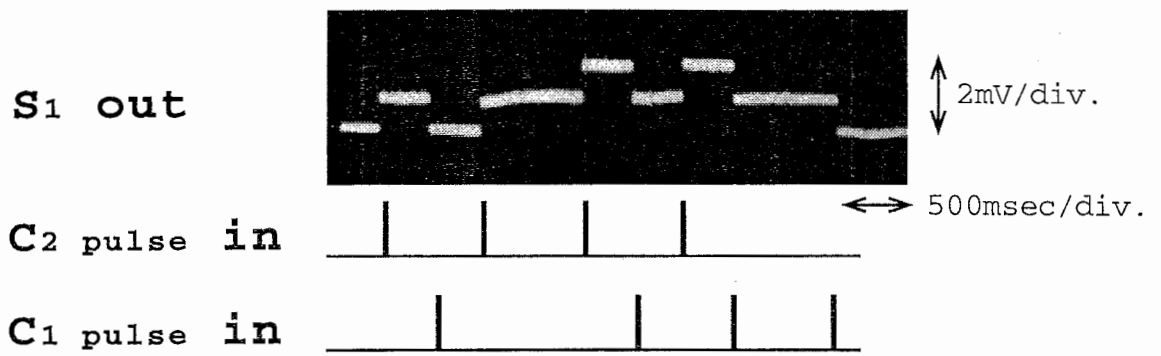


図10 準安定状態を經由した遷移

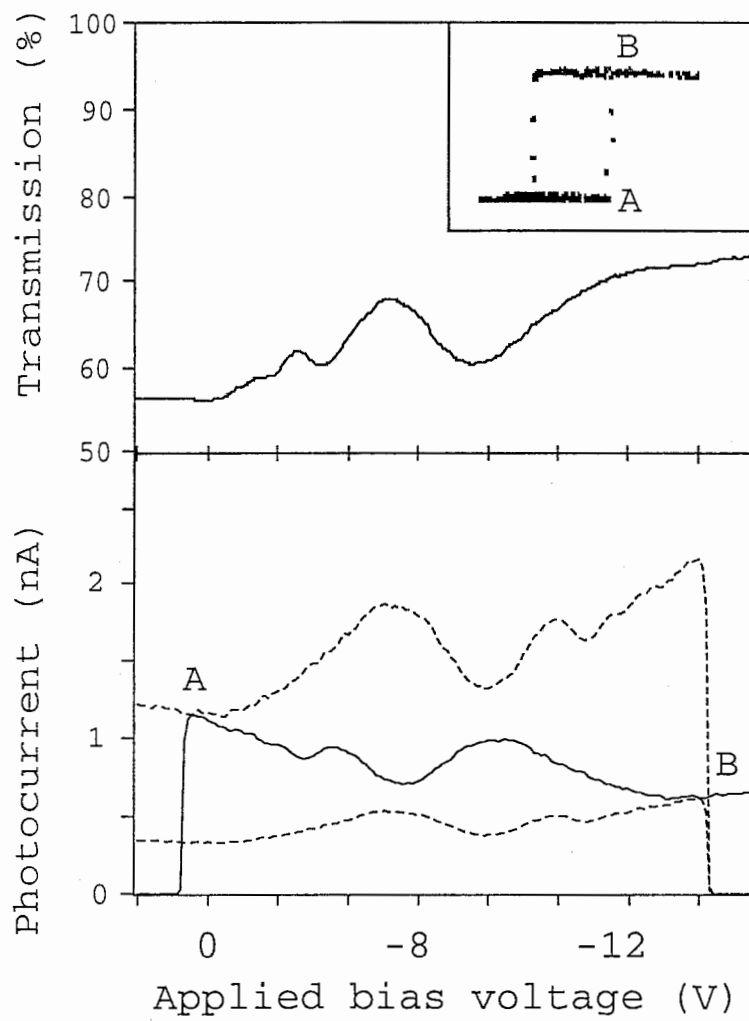


図11 準安定状態を示すWSL-SEEDにおける
実際の*i*-*V*特性と透過率 ($\lambda=770\text{nm}$)

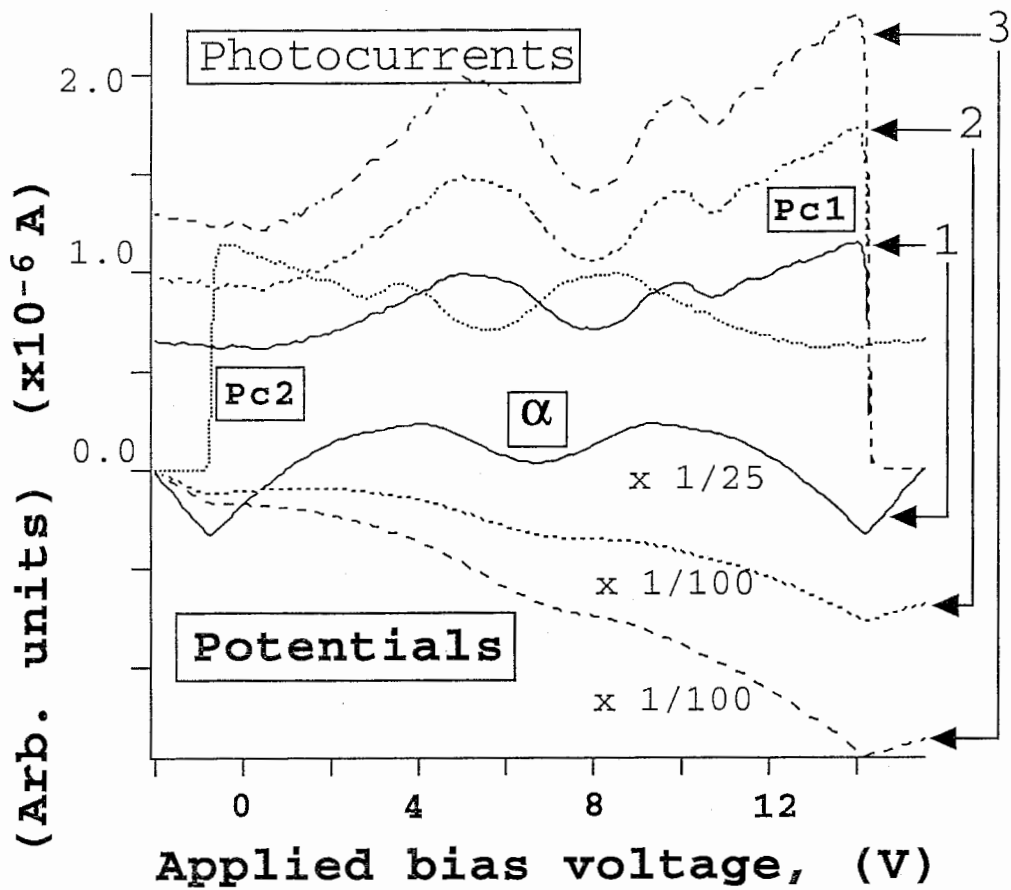


図 1 2 実際の素子特性から計算されたポテンシャル関数

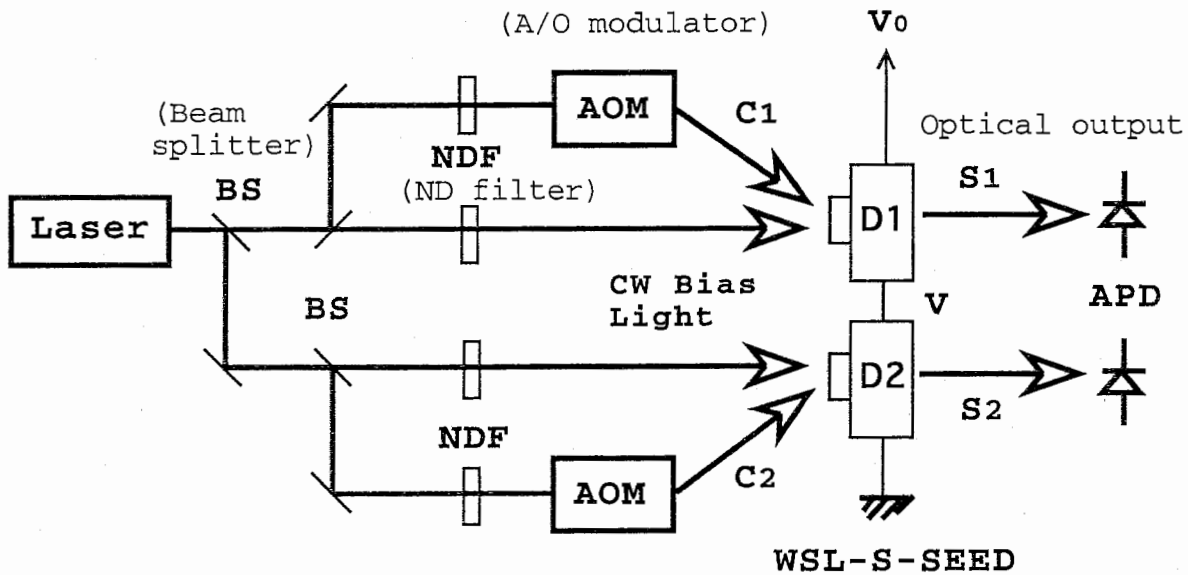


図 1 3 準安定状態観測のための実験系の構成 ($\lambda=770\text{nm}$)

D1側に入れば、ポテンシャルはふたたび3に戻るため、系は α 点から抜け出して一番右側の極小点へと落ち、光パルスをきったのちもその極小点はポテンシャル1上に残っており消えないので系はその極小点に残留する。また、D2にパルス光を入れ、 $Pc2$ を変化させた場合もポテンシャル関数の対称性 ($U[Pc1;Pc2]$ において、横軸に対応する電圧 V を左右反転すれば $Pc1$ と $Pc2$ を可換にできる。)により、上に述べたのとまったく同じ動作が逆方向に起こる。なお、図10においてスイッチング時間がmsレンジオーダーとなっているのは実験系の光強度が弱いためと、素子のメササイズが大きいため素子の静電容量が大きいためであり、前章で論じられたように光強度差、すなわち ΔPc を大きくしたり、素子容量を小さくすれば、より高速にスイッチングする。

次に、ある程度強い、または時間的に長い光パルスを入射した場合には、準安定状態で止まらずに完全なセット/リセット状態へ遷移する。そのとき、前の議論でも分かるように、(2)式より、光が入射された側のダイオードのポテンシャル関数" C "上を $1/C \cdot \Delta Pc$ なる速度で V は変位し、その電圧に対応した透過率の変化がD1またはD2の透過光に反映されるはずである。これを示したのが図14であり、完全にSEED素子の透過率対印加電圧特性(図11参照)のレプリカとなっている^{8),23)}但し、注意としては ΔPc の大きな部分は速く通り過ぎるため、山谷の形状は ΔPc の大小によって伸縮されていることである。従って、このような透過光の微細構造を観測することによって、使用されているSEED素子の透過率における山谷の状態も簡便に判定できる方法として利用可能である。

以上に述べてきたように、準安定状態遷移を使用したS-SEEDシステムは簡易な構造という長所を持ち、全光型のデジタル多値論理ゲート、双方向性カウンター、パルス幅弁別器等に利用できる可能性を有する。

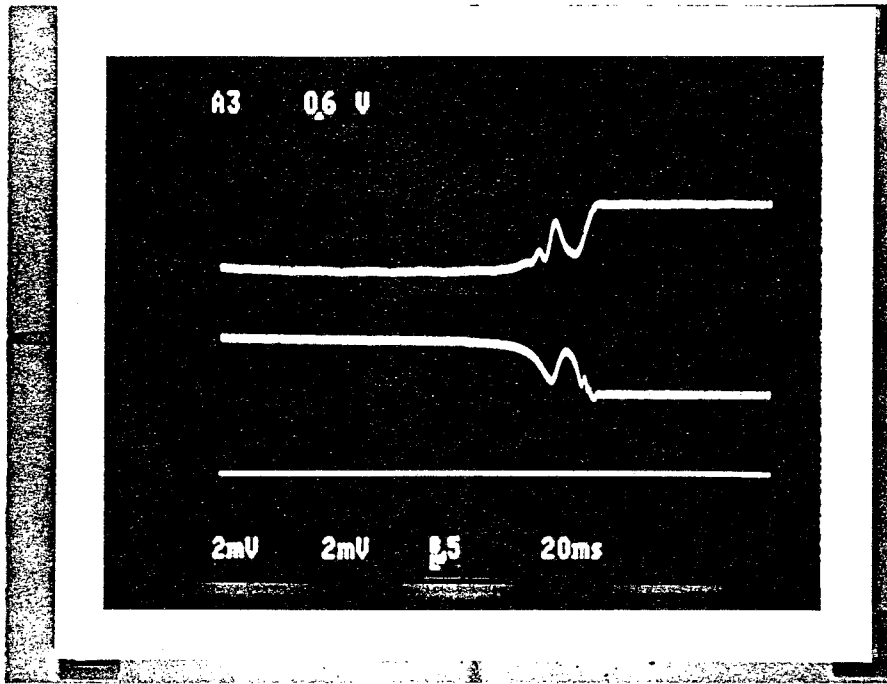


图 1 4 过渡的光出力

以下に述べるのはWSL-S-SEEDを利用したアナログ型の全光型3端子素子、光トランジスタの詳細である。

5-1 ポテンシャル関数法からの予測

ポテンシャル関数法を用いて次に述べるようなS-SEED系を解析した場合、以下のようなおもしろいことがわかる。図15に見られるような、S-SEED系において両方のSEEDの*i-V*特性の負荷曲線を図15a)のように重ね合わせることができた場合、浅く広い極小値領域を持ったポテンシャル関数が得られる。このような性質は両方のSEEDの*i-V*カーブの交わる点での傾斜がほとんど等しいためにポテンシャル関数を積分で得ている式(4)の ΔP_c 項が*V*の広い範囲に渡って少しずつしか変わらないためである。これに対し、図15b)に示したように、両方のSEEDの*i-V*カーブの傾斜が相当程度異なって負荷曲線図上で交わった場合、ポテンシャル関数は深く狭い谷を持つようになる。

図15a)のように浅い谷を持ったポテンシャル関数において、片方のSEEDに対する入射光強度を少しだけ変化させた場合、ポテンシャル関数における極小点の位置は大きく変化する。これを実際のWSL-SEEDにおいて*i-V*カーブをうまく設定して重ね合わせたと仮定して、ポテンシャル関数を計算したのが図16に示された結果である。図16a)には実際のWSL-SEEDの負荷曲線を、図16b)にはその時のポテンシャル関数の計算値を示す。微小な光入射強度のアンバランスによって黒点で表わされたように極小点の位置は大きく変化し、かつ、図中に点線で示されたように、極小点に対応する中点分配電圧は入射光強度変化分に対しほぼリニアな動きをする。また図15a)で浅いポテンシャル関数の図に示されたように中点電圧が変わる、すなわち、各SEED素子にかかる電圧が変わるなら、それに対応して光電流値が変わることがわかる。光電流値が変わるのはSEEDにかかる電圧変化によって素子の光吸収率が変化したことにはほかならないので、すなわち、素子から透過して来る出射光強度が変化することになる。

以上を鑑みると、このS-SEED系は次のような作用をなすことがわかる。

- 1) 入射光の微小な変化が増幅されて出射光強度の変化に反映する可能性がある。
- 2) 入射光の変化は、ほぼリニアに出射光に反映される。

上記第1項を満たすためには、浅いポテンシャル谷の極小点の位置の大きな動きに対応した素子に印加されている電圧の変化に対し、素子の光吸収係数の変化が十分大きく変化する必要がある。言い換えれば、*i-V*カーブの傾斜が動作点（負荷曲線上の交点の近傍）で十分大きな傾斜を持っている必要がある。（図15a)にはこのような例が示されている。）また、浅く広い谷を持つといったポテンシャル関数の形状が大きな電圧変化範囲で保存されている必要も安定性解析から明らかである。（谷である極小点が無くなると、このS-SEED系は別の安定点に遷移してしまう。）従って、図15a)にあるような*i-V*カーブの負荷曲線上の交点を形成する交わり部分が長いあいだ保持される必要があ

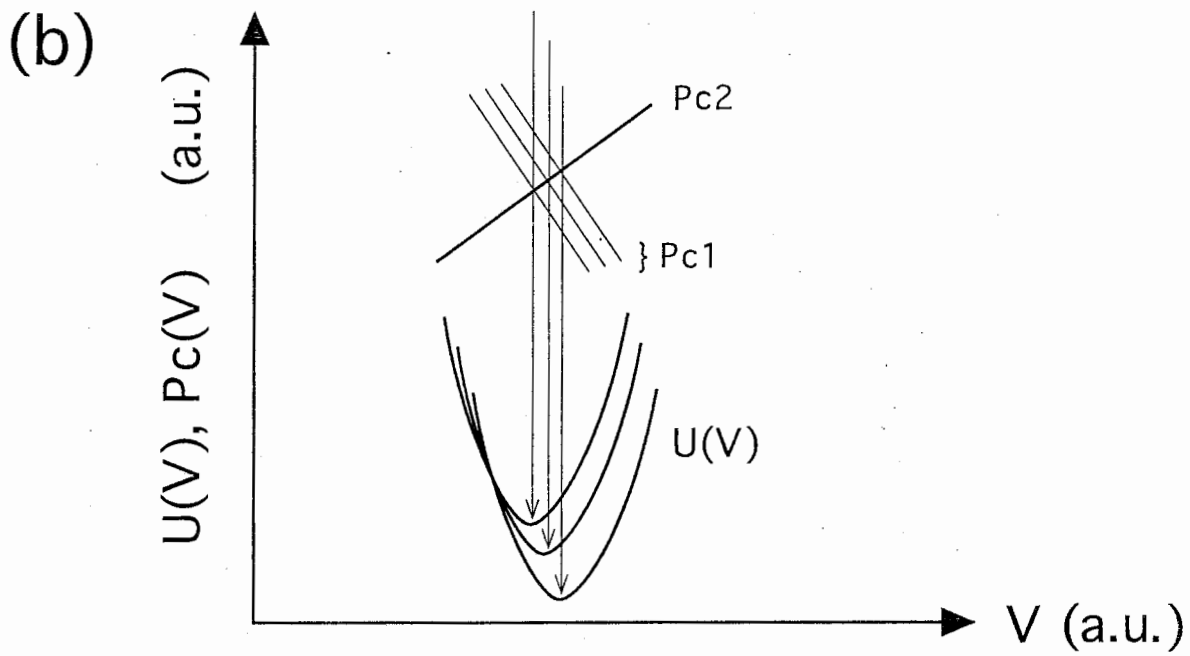
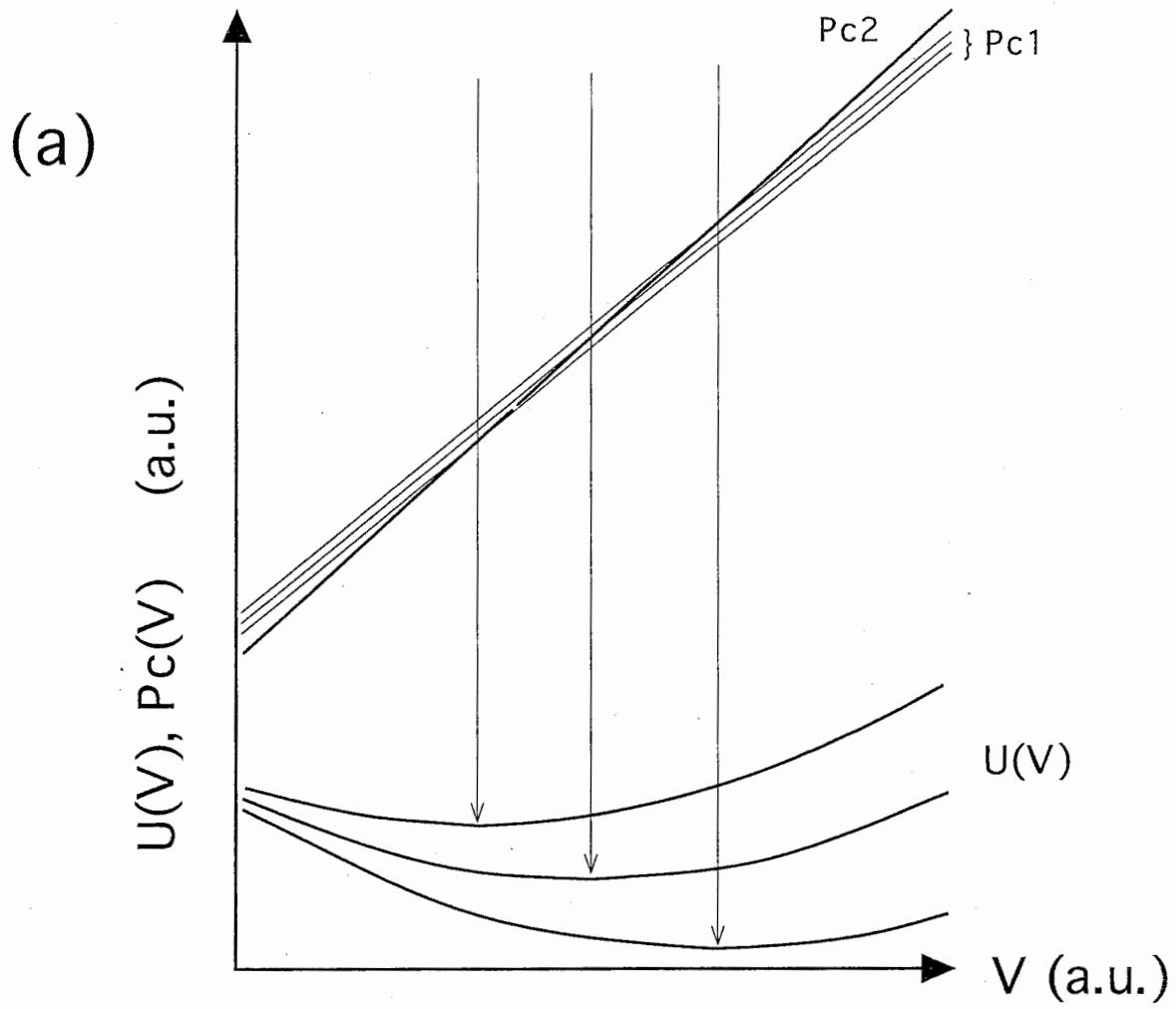


図15 浅いポテンシャル関数を生じる傾斜の似かよった*i*-*V*負荷曲線

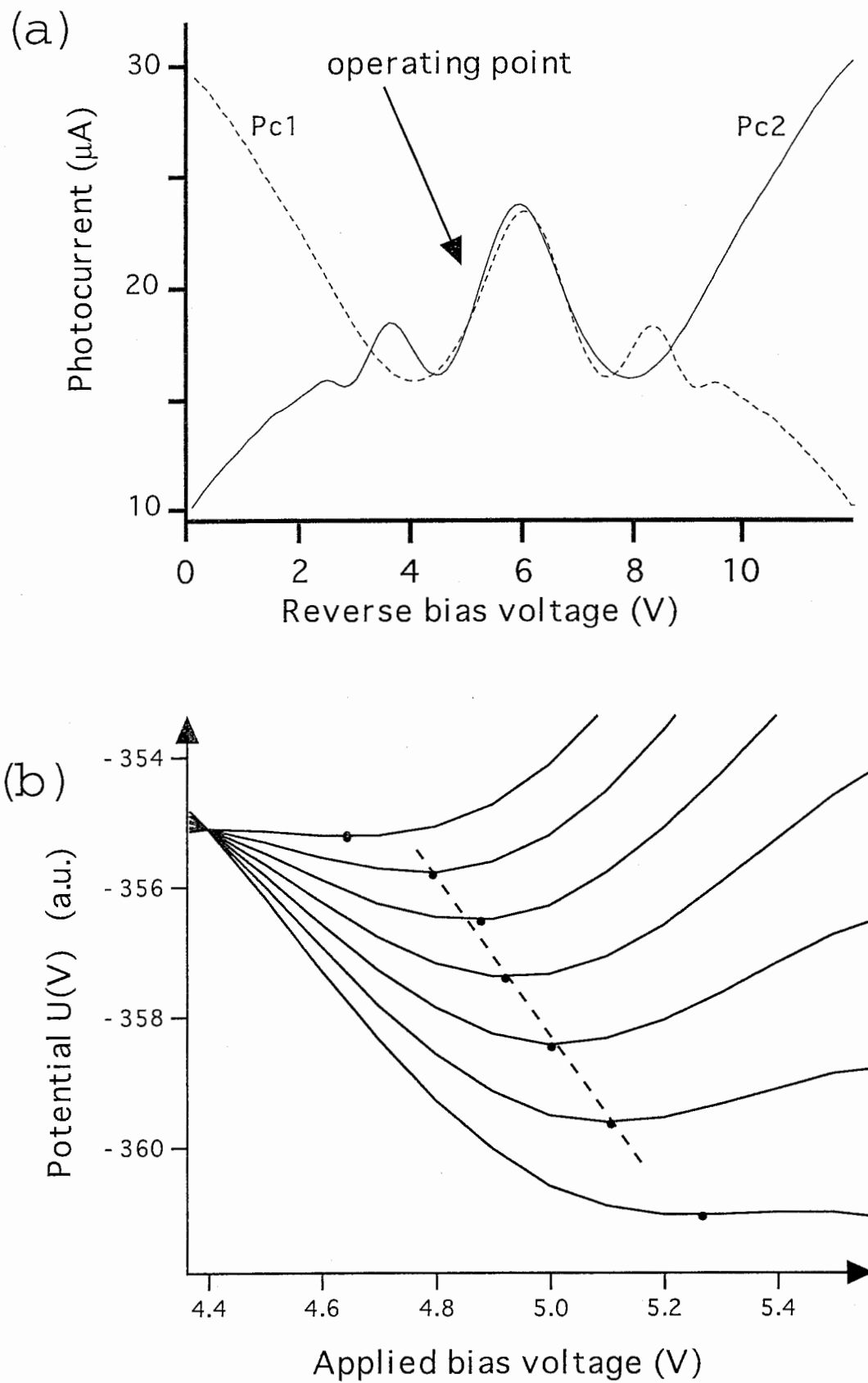


図16 浅いポテンシャル関数の極小点の位置の変化

る。このような*i-V*カーブ形状を持てるSEED素子はそれほど多くない。QCSE型SEEDの場合、*i-V*特性上の極大点の左右の傾斜は通常まったく等しくない。これはQCSE型における負性抵抗領域を形作る成因がエキシトン吸収ピークのシュタルクシフトによるものであり、このような効果を使用した場合、電界印加によるエキシトンピークのブロードニングの効果が強電界サイドで強く出て*i-V*曲線上の極大点の両サイドの傾斜が大きくなりすぎてしまうからである。これに対し、図1 6 a)に例示されるようなWSL-SEEDにおけるシュタルク階段準位の-1 Stark Ladder準位に成因される*i-V*特性上のピークを使用した場合には、ミニバンドからサブバンドへの遷移の中間的な強電界に至る前段階の電圧範囲にあるため、高い電界側での吸収ピークのブロードニング効果の影響は少なく、ほぼ左右同等の*i-V*カーブ上の傾斜が得られる。この図1 6 a)においては2 monolayerという非常に薄いバリアー層を持つWSL-SEEDの実際の*i-V*特性が示されている。このように薄いバリアー層をもつWSL-SEEDにおいては電子のトンネリングが十分な強度で起こるためにシュタルク階段準位による*i-V*カーブ上の負性抵抗領域を有するピークも十分な高さを持って出現する。

以上のように、WSL-SEEDを使用すれば上記ポテンシャル関数を用いた解析から得られるゲインを有したアナログ的動作が実現できる可能性があり、以下の章では実際にその動作を確認し、系のゲインが如何に評価されるかが述べられる。

5-2 全光型トランジスターの実現

5-2-1 変調度の理論的検討

本項では前節で予測が成されたワニエシュタルク型対称自己電気光学効果素子 (WSL-S-SEED) を用いた全光型トランジスターの変調度の理論的な見積もりを行う。

図17 (a) に本節で議論するS-SEEDの構成図、(b) にS-SEEDの負荷曲線図における動作点近傍の拡大模式図を示す。各SEED(D1、D2) は、その光電流-電圧特性に少なくとも一つの負性抵抗領域を有するSEEDとする。 P_1 および P_2 は各SEEDに照射される一定強度のバイアス光で、 P_1 に加えられた変調成分 ΔP_1 が回路中に流れる光電流を変化させ、これにより各SEEDの電圧配分が変化するためD2の透過光が ΔP_2 だけ変調される。ここで、

$$G \equiv \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \quad (5-1)$$

を変調度と定義し、その値について考察することにする。尚、以下の説明において、動作点は ΔP_1 により別の安定点へは遷移せず ΔP_1 の照射を止めると元の安定点に戻るものとし、また、各素子の光電流-電圧特性は動作点近傍において直線近似できるものとする。

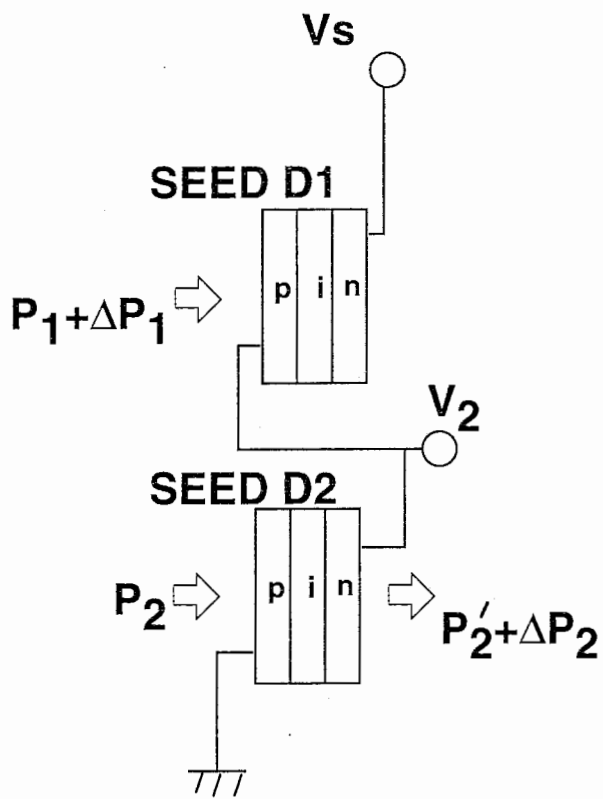
図17 (b) において実線 (破線) はD1 (D2) が一定バイアス光 P_1 (P_2) で照射されている時の光電流-電圧特性を表す。この時の動作点はAであるが、ここでD1の光入力に ΔP_1 が付加されるとD1の光電流-電圧特性は点線のように変化しこれに伴い動作点はBへと移動する。この場合、回路に流れる電流の変化は $I_1 + I_2$ であるが光入力 ΔP_1 による分は I_1 のみであり残りの I_2 は定電圧電源から供給される。これがゲインの源である。図17 (b) より動作点における両素子の負荷曲線の傾きの差の値が小さければ I_2 は大きくなり、大きなゲインが得られることが容易に予想される。

入力光 P によって生成された光電流 P_c は一般に、

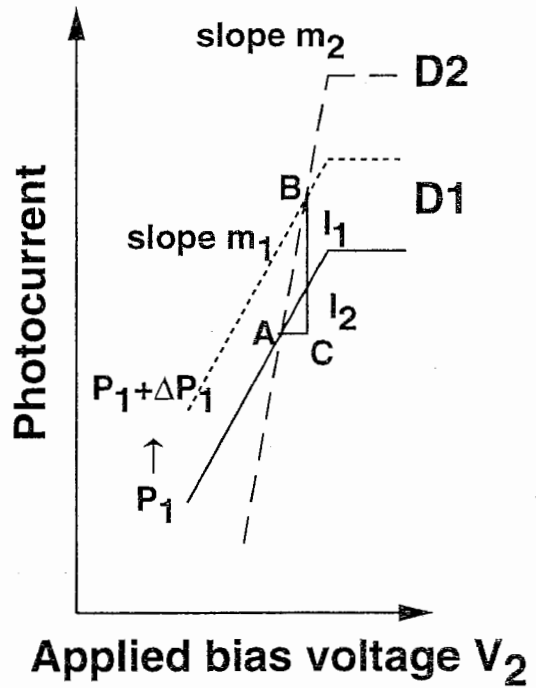
$$P_c = \frac{P \cdot (1 - R) \cdot [1 - \exp(-\alpha_{nx} L)] \cdot e\eta}{h\nu} \quad (5-2)$$

と表される。ここで、 R は素子の反射率、 α は光入力エネルギー $h\nu$ における素子の吸収係数、 L は吸収長、 η は素子の内部量子効率である。SEEDにおいて吸収係数はバイアス電圧に依存するため素子D1のA、Cにおける吸収係数と素子D2のA、Bにおける吸収係数は異なった値を持つ。そこで素子Dnの動作点Xにおける吸収係数を α_{nx} とする。また、エネルギー保存則は、素子の吸収率A、透過率Tを用いて、

$$1 = R + A + T \quad (5-3)$$



(a)



(b)

図 1 7 (a)S-SEED構成図
(b)動作点近傍の負荷曲線拡大図

と表せるので、動作点近傍で直線近似したD1、D2の負荷曲線の傾きを m_1 、 m_2 とすると変調度 G は、

$$G \equiv \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = - \frac{(1-R) \cdot [1 - \exp(-\alpha_{1B}L)]}{\left(1 - \frac{m_1}{m_2}\right)} \quad (5-4)$$

となる。

この式より、変調度 G は吸収係数 α 、吸収長 L 、両負荷曲線の傾きの比 m_1/m_2 に依存する事がわかる。より大きな変調度を得るには、大きな吸収係数を有する材料を用いて吸収長を厚く設計し、動作点における傾きの比ができるだけ1に近くなるようにしてやればよい。例えば、吸収係数を 10000cm^{-1} 、素子の反射率を無反射コーティングにより0%、吸収長の厚さを $1\mu\text{m}$ とすると、両負荷曲線の傾き比0.995、0.95に対して100、10ものゲインが得られることになる。

このように適切な動作点を選ぶことにより大きなゲイン特性が期待できるわけであるが、動作点の選択にあたってはいくつか注意すべきことがある。まず、動作点は素子D1にとっては負性微分抵抗領域にあるがD2にとっては正性微分抵抗領域にあるため、このシステムに用いられるSEEDには少なくとも一つの負性微分抵抗領域を有する必要がある。さらに動作点における傾きの比をできるだけ等しくするには、その負性微分抵抗領域と正性微分抵抗領域の傾きの絶対値がほぼ等しくなくてはならない。また、この正性微分抵抗領域において生成される光電流は出力変調のための光入力に比例する必要がある。光キャリアの掃き出しが悪いゼロバイアス付近の正性微分抵抗領域は使えない。最後に動作点が広い電圧範囲に渡って安定点でなければならないのは言うまでもない。一方、ワニエシュタルク型SEEDは、シュタルク階段遷移による吸収のため、その電流電圧特性中のゼロバイアスから離れた電圧において多くの正性、負性微分抵抗領域を有する。そこで我々はこのゲインシステムを実証するにあたり、ワニエシュタルク型SEEDを用いた。

5-2-2 変調度の測定

図18に実験に用いたワニエシュタルク型SEEDの構造を示す。素子はMBEによりn-GaAs基板上に成長した100周期のGaAs/AlAs短周期超格子からなる。超格子部の井戸層は 3.4nm 、障壁層は 0.56nm である。このように薄い障壁層ではミニバンド幅が大きくなるので多くの負性微分抵抗領域が期待でき、本システムの実証に好適である。本素子のシュタルク階段遷移エネルギーは、GaAs基板の吸収波長帯に存在するので、素子の基板部をエッチングにより取り除いて透過型素子とした。

図19に本実験に用いたS-SEEDシステムの負荷曲線図を示す。光源には発振波長 788nm の半導体レーザを用いた。用いたワニエシュタルク型SEEDはこの波長において高次のシュタルク階段遷移による明確なピークをいくつか示し、その一つを選ぶことによ

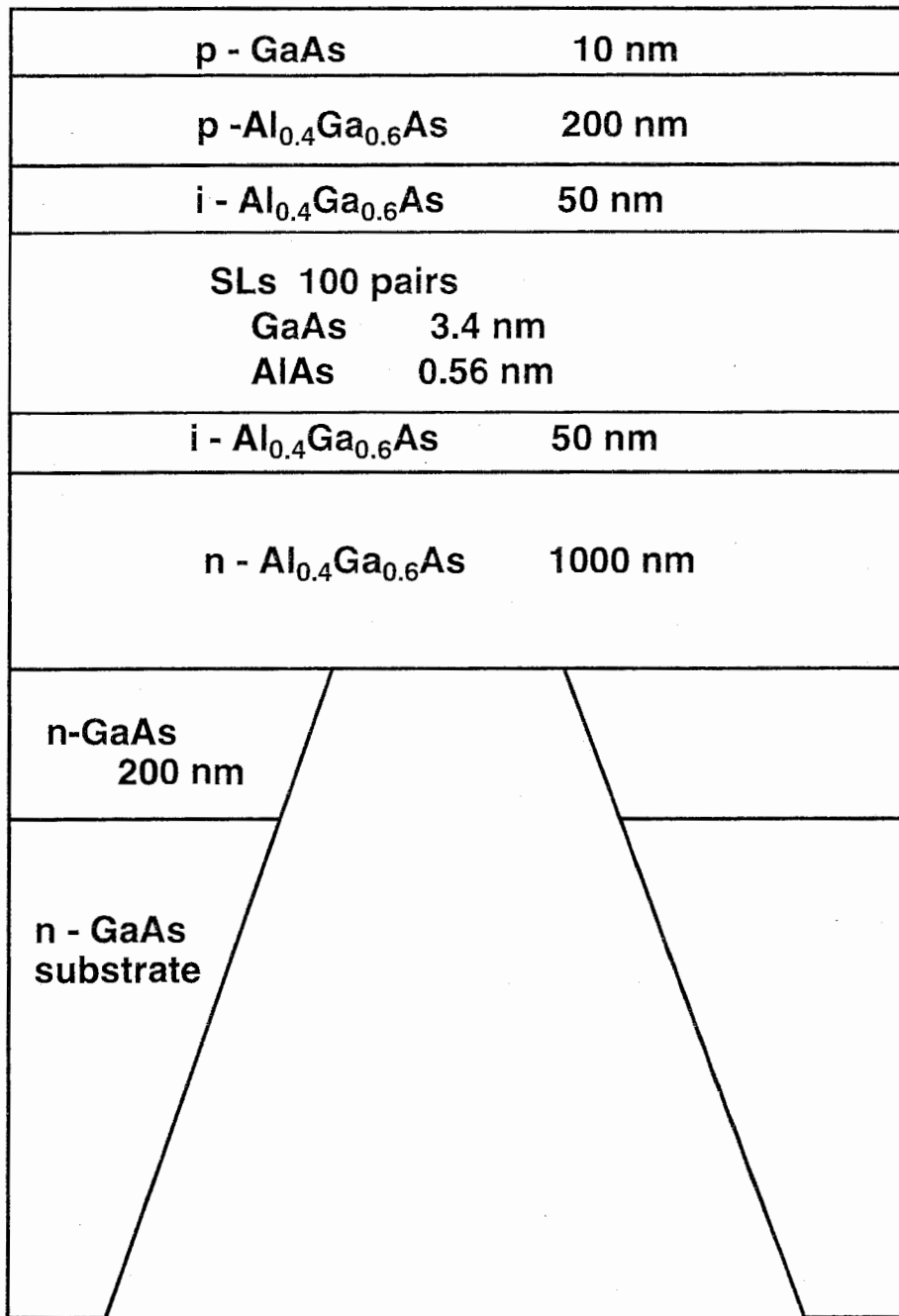


図 1 8 ワニエシュタルク型SEEDの構造

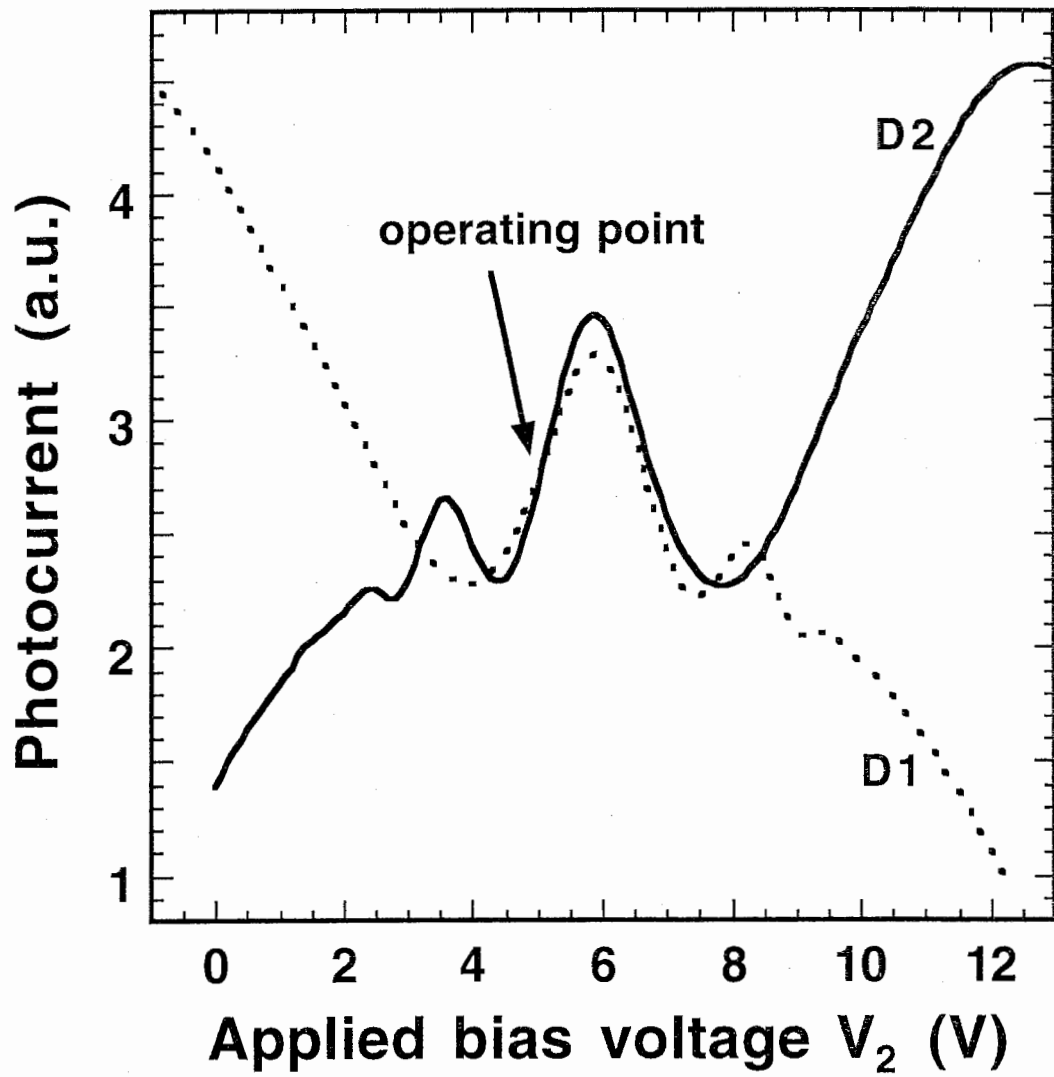
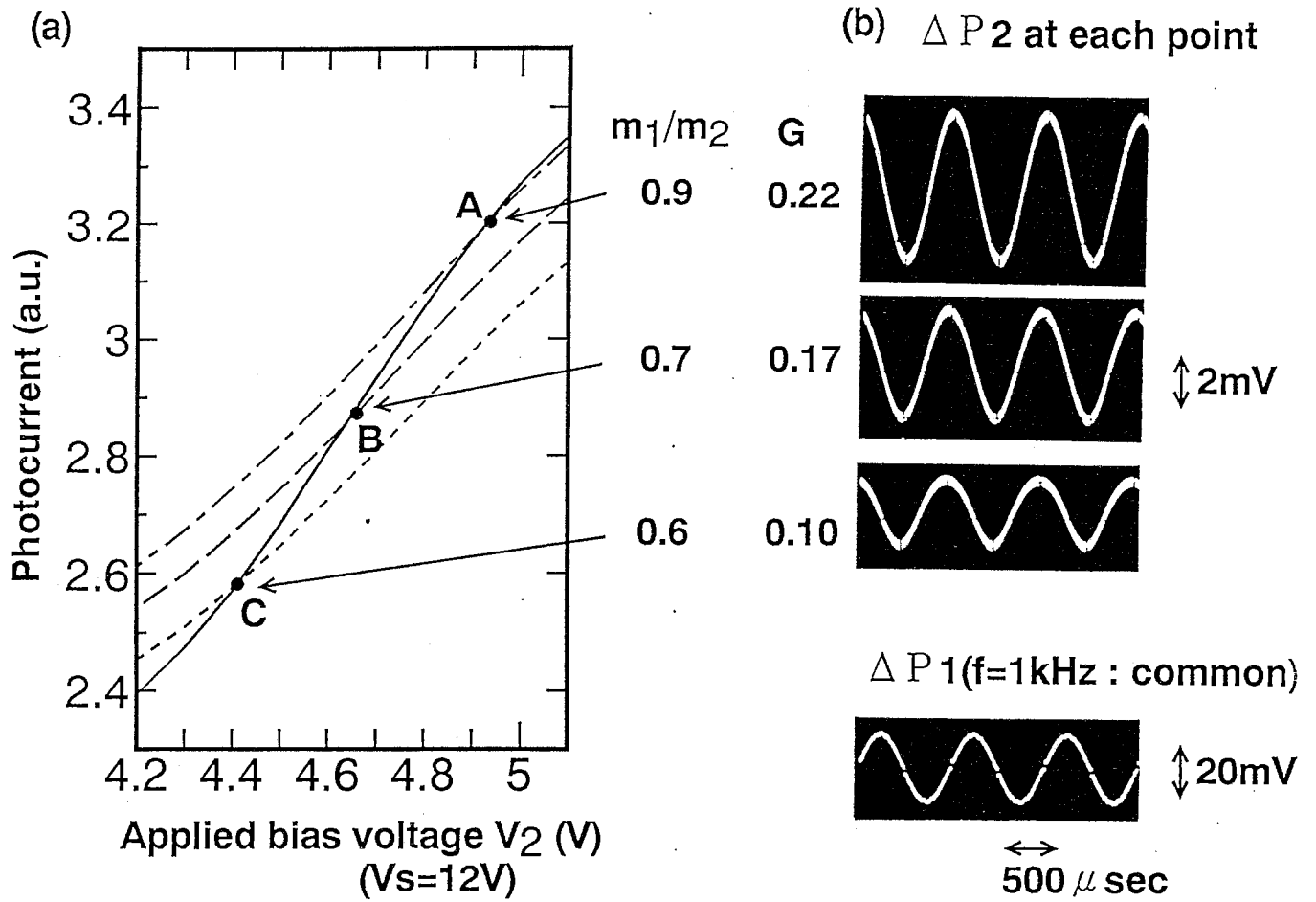


図19 実験に用いたシステムの負荷曲線図

り、前節で述べた動作点の条件を容易に達成できる。定電圧電源を12Vとし、入射光の強度を調節することで、図に示すようにそれぞれの2次のシュタルク階段遷移によるピークがほぼ重なるようにすることが可能である。具体的には、まず各素子に入射する半導体レーザの出力 (P_1 , P_2) を数mWに調整してシステムをV2が5Vの安定点にセットし、次にD1の入力光に変調光として適当な強度の1kHzの正弦波を重畳し、D1の入力光 ($P_1 + \Delta P_1$) と、D2の透過光 ($P_2 + \Delta P_2$) をSiのアバランシェフォトダイオードを用いて検出した。変調光による光電流変化は 10^{-7} Aオーダーで、それぞれの交流成分 ΔP_1 , ΔP_2 をオシロスコープにより観測した。

図20に得られた実験結果を示す。(a)は傾きが異なる3つの動作点近傍の拡大図、(b)は各動作点における ΔP_2 の観測波形、(c)は動作点が両素子の正性微分抵抗領域にあり前節で述べたゲインを得るための諸条件を満たしていない場合における観測波形を示す。尚、1kHzの入力変調光 ΔP_1 は(b)の下部に示すとおりである。図から明らかなように変調度 G は動作点近傍の傾きの比に大きく依存し、傾きの比が1に近づくとつれて変調度が大きくなるのがわかる。一方、ゲインの条件を満たしていない動作点における変調度は(c)に見られるように非常に小さい。

残念ながら本実験では1を越える変調度すなわちゲイン特性を示す結果は得られなかった。しかし、変調度の理論式(5-4)によれば、図20(a)の動作点近傍における吸収係数を 3000cm^{-1} 、吸収長を $0.4\mu\text{m}$ 、反射率を30%、 m_1/m_2 を0.7として、変調度は0.25と計算され、実験値と非常によく一致することから、前節で提案した原理が正しいことが実証された。今後、吸収係数の大きな材料や波長の選択、吸収領域の増大、ファブリーペロー構造のブラッグ反射膜の採用等により1以上の変調度すなわち光トランジスターの実現が期待できる。



(c) at an operating point outside of the gain conditions ($V_2=1.82V$)



図 20 実験結果

第6章 まとめ

以上述べてきたように、ワニエ・シュタルク局在効果型SEED素子はQCSE型SEEDにない特徴を持ち、種々の光処理ファンクションを容易に実現できる可能性を有する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、その機会を与えていただきましたATR光電波通信研究所第一期社長の古濱氏、および第二期社長の猪股氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) D. A. B. Miller, *Optical and Quantum Electronics* **22**, S61 (1990).
- 2) A. L. Lentine, H. S. Hinton, D. A. B. Miller, J. E. Henry, J. E. Cunningham and L. M. F. Chirovsky, *IEEE J. Quantum electron.*, **QE-25**, 1928 (1989).
- 3) D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus, *Phys. Rev.*, **B32**, 1043 (1985).
- 4) G. H. Wannier, *Rev. Mod. Phys.*, **34**, 645 (1962).
- 5) E. E. Mendez, F. Agulló-Rueda and J. M. Hong, *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 2426 (1988).
- 6) J. Bleuse, G. Bastard and P. Voisin, *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 220 (1988).
- 7) M. Hosoda, K. Kawashima, M. Inai, T. Yamamoto, and K. Fujiwara, *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 2754 (1993).
- 8) 細田 誠、川島 健児、藤原 賢三、渡辺 敏英、*信学技報 OQE92-115* (1992).
- 9) M. Hosoda, K. Kawashima, K. Tominaga, T. Watanabe, and K. Fujiwara, *IEEE J. Quantum Electron.* **31**, 954 (1995).
- 10) K. Kawashima, M. Hosoda, and K. Fujiwara, *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 184 (1993).
- 11) M. Hosoda, K. Kawashima, K. Tominaga, and K. Fujiwara, *Solid-State Electron.* **37**, 847 (1994).
- 12) M. Hosoda, K. Kawashima, T. Watanabe, and K. Fujiwara, in *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, (CLEO'93)*, CThS74 (Baltimore, Maryland, 1993).
- 13) K. Tominaga, M. Hosoda, K. Kawashima, T. Watanabe, and K. Fujiwara, in *Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, (CLEO'94)*, CTuK40 (Anaheim, California, 1994).
- 14) K. Tominaga, M. Hosoda, K. Kawashima, T. Watanabe, and K. Fujiwara, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 141 (1994).
- 15) H. Schneider, K. Fujiwara, H. T. Grahn, K. V. Klitzing, and K. Ploog, *Appl. Phys. Lett.* **56**, 605 (1990).
- 16) J. Bleuse, P. Voisin, M. Allovon and M. Quillec, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, 2632 (1988).
- 17) K. Kawashima, K. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Shigeta, and K. Kobayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, L793 (1991).
- 18) K. Kawashima, K. Fujiwara, T. Yamamoto, M. Sigeta and K. Kobayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **30**, L1542 (1991).
- 19) 川島 健児、藤原 賢三、細田 誠、ATR技術研究報告 TR-O-0052 (1992).

- 20) See, for example, W. Hirsch and Stephen Smale, *Differential equations, dynamical systems, and linear algebra*, (Academic Press, New York, 1974).
- 21) H. Haken, *Synergetics*, (Springer-Verlag, New York, 1978) 2nd ed.
- 22) D. A. B. Miller et al., IEEE J. Quantum Electron. **QE-21**, 1462 (1985)
- 23) K. Fujiwara, K. Kawashima, M. Hosoda, K. Tominaga, T. Yamamoto, and K. Ploog, *Superlattices and Microstructures*, **15**, 351 (1994).