

氏 名 (本 籍)	川 路 昭 (東 京 都)
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 第 3 8 号
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 4 3 年 1 月 1 2 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
最 終 学 歴	昭 和 2 8 年 3 月 東京工業大学金属工学科卒業
学 位 論 文 題 目	半 導 体 レ ー ザ 論 理 演 算 素 子 の 研 究
	(主 査)
論 文 審 査 委 員	教 授 西 沢 潤 一 教 授 和 田 正 信 教 授 喜 安 善 市

論 文 内 容 要 旨

§ 1 概 要

半導体の注入レーザを用いて超高速の光結合による functional device を設計製作した。この device は三つの共振モードで発振させることが出来る一つの半導体レーザ素子で、半加算器の動作をすることが認められた。

注入レーザを用いた論理要素の動作を検討し、propagation delay の測定も行なつた。半導体レーザの実用上の欠点とみなされていた冷却の問題を解決する手段として、液化ガスを使用しない保守の簡単な極低温発生装置をこの領域の cryoelectronics に応用し、注入レーザ論理素子の連続動作をさせることが出来た。

§ 2 は し が き

計算機の高速化、大容量化に伴い、より高速の論理演算が常に要求されている。現状ですでに実用され始めている集積回路素子は高速化と低価格、高信頼性の要求に応じる現実的な打開策ではある。

現在製品化されている集積回路の CML は一つの論理要素について propagation delay が約 1.5 n sec で、極めて近い将来に 1 n sec を若干下回ることになる。然し集積回路方式の論理素子は LSI が実用化しても delay time は 0.1 n sec が極限と考えられる。これは周辺回路との結合に、たとえばビームリードの方法を適用してもインダクタンス成分が問題になり不整合のための delay が影響することになる。

実際の論理演算の加算回路ではいくつかの論理要素が直列に使用されているから delay も要素の数だけ加わることになり、0.5 ~ 1 n sec が限界になると考えられる。

結合の不整合による delay を防止する手段として光結合が適当であることは西沢教授により提案されたものであるが、超高速発光部品としてレーザ・ダイオード、又検出用光電変換部に半導体の光ダイオードの組み合わせが最もよいとされていた。然し電気回路を使わずに光結合のみで回路構成するにはレーザ・ダイオードの活性領域の幅が 2 ミクロンの程度なので、一度外部に放出された光を再び入射させるときの集光が問題であり、実現性は難かしかつた。

この論文では、一個の半導体注入レーザ素子中にいくつもの共振モードが立つことが出来るような構造にしたものに、複数の電極を設けて素子の場所によつて電流密度が異なるように制御して、それら発振モードに変化を与えてその相互作用を利用し、出力のレーザ光と入力 of 電気信号の関係が論理演算式を満足するように動作する機能素子に関するものである。

この方法の特徴は、

1. 光結合がすべて一個のレーザ素子内にあるから結合の能率が非常によい。
2. 半導体レーザのパルス応答時間が光電変換の場合に 0.1 n sec 以下になると推定されていたが、この報告の測定結果からレーザモード間の相互作用も同様の delay time であることが考えられ、素子そのものが超高速である。
3. 機能素子であるから構造が比較的単純で、製作が容易である。
4. 演算出力もレーザ光で光結合の optoelectronic 式のものとなる。
5. 検出に用いられる光電変換光素子は pn 接合なだれダイオード等の二端子部品であるから超高速のものが比較的容易に製作出来る。

この素子の実際の構造は図 4.1 のようになっていいる。図から分るように一個の n 形 GaAs 単結晶表面に p 形部分があり、この p 形部分は pn 接合に達しない程度の深さの細いみぞによって 5 つの領域に分割されている。これら 5 つの領域には、夫々オーミック接続により電極が取り出されていて図のように結線されている。

動作は入力電気信号 A, B に対してレーザ出力 S 及び C₀ が論理式

$$S = \overline{AB} + \overline{A}B = (A + B) (\overline{AB}) \quad \text{和出力}$$

$$C_0 = AB \dots \dots \dots \quad \text{けた上げ出力}$$

を満足する。即ち真理値表は表 2.1 のようになる。

入 力		出 力	
A	B	S	C ₀
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1

表 2.1

この素子の動作を論理要素に分解して論理回路を書くと図 2.1 のようになる。

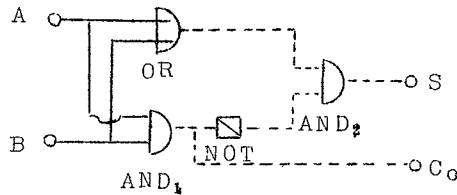


図 2.1

この図の実線は電気回路、点線は光結合回路になっている。

このレーザ加算素子は、上図の各ゲート、インバータが夫々独立しないで同じ領域が二つの要素の動作を兼ねているのが特長で、構造の簡単化に寄与している。これを分解して示すと図 2.2 のようになり、右側の三つを重ねたようになる。

バイアス電極は動作点を閾値近傍に保つ作用も兼ねていて全体の speed up にも役立つている。

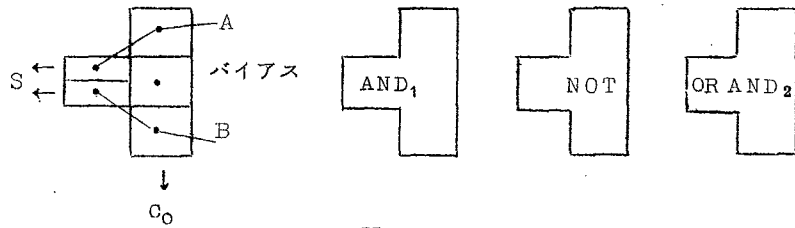


図 2.2

半導体注入レーザの動作は 20°K 以下に保つと連続安定に行なわれるから、冷却手段の実用化のために、特にフィリップス社製PEH-100型極低温発生装置を用い、これに装着して動作試験を行なった。

§ 3 素子の製作

素子は動作温度が低温であるから、低温特性のよい亜鉛の気相拡散を用いてP形領域を形成させた。この場合、plane diffusion法を開発して閾値を低下させることが出来た。

複数の電極を取り出すのにplanar形多接合のものと、細いみぞによつてP形領域をせばめて分割するのと二つの方法がある。planar接合を作るとき SiO_2 被膜のGaAs上への被着を行なつて選択拡散のマスクにした。

みぞを作る場合はワックスによるマスクを用いてエッチングした。crosstalk resistanceはplanar接合では極めて高く、みぞによる電極分離型は $1.5 \sim 3 \Omega$ であつたが電気的な分離には充分であることが認められた。

素子は放熱のために無酸素銅のヘッダ上にn側を蟻付けし、インジウム箔をはさんで極低温発生装置の冷却面に圧着した。

各電極はニッケルをシンターした上に錫を溶着したGaAsの面から取り出してある。

§ 4 測定結果

1. パルス応答の測定

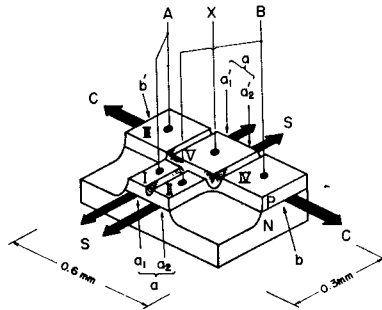
検出器は応答時間 0.1 n sec 程度のシリコンのなだれダイオードを用い、測定には立上り時間 0.6 n sec のパルス発生器を用いた。素子内モードの相互作用の測定には同期したパルスに若干の時間差を与えて三極レーザのquenchingの立下り時間及び回復時間を求めた。レーザ・ダイオードの立上り、立下り時間、モード相互作用の場合の動作時間はい

ずれも電流パルスに放出光が follow している。

2. 半加算器素子の測定

注入レーザーに不均一電流密度を与えてレーザー発振のモードを制御し、内部光結合を用いて半加算器の動作をする functional device を作ったがこの測定結果について述べる。

図 4.1 は半加算器を示す図である。この pn 接合は $1.1 \times 10^{18} \text{ Te/cm}^3$ の n 形 GaAs 単結晶の (100) 面に亜鉛を気相拡散させて作ったものである。三つの Fabry-Perot の共振構造を作るために、四辺 (a, a' 及び b, b') を劈開して反射面を作った。図 4.1 の 5 つの領域、



即ち I, II, III, IV, V は夫々エッチングで作られたみぞで電氣的に分離されている。これらのみぞは pn 接合のごく近い深さまで p 領域がエッチングされていて各領域間の間に高抵抗部分を形成している。領域 I と III 又 II と IV は夫々接続されている。

この素子の領域 V に適当なバイアス電流を流しておいたとき、図の電極 A と n 領域間に順方向に信号電流を流すと、領域 I と III に属する接合部に順方向電流が流れて図の S 方向にレーザー発光する。又同様に B と n 領域との間に通電したときも S 方向にレーザー光の出力ビームが得られる。

若し A, B 両電極に同時に信号入力があったときは、この素子は S 方向のレーザー発光はおこなわずに C 方向にレーザー発光することが測定により確かめられた。これらの動作は半加算器の真理値表 表 2.1 を満足している。

図 4.2 は 77°K に於けるこの素子の動作を示すオシロ波形である。光出力 S 及び C は光電変換素子としてシリコンの高速なだれダイオード等を用いて電気出力に変えて測定した。図 4.2 の X はバイアス電流、A は入力 A ($1 \text{ A} / \text{div}$), B は入力 B ($1 \text{ A} / \text{div}$), A はレーザー出力 S (Sum), C はけた上げ用出力 C (Carry) である。又水平のスケールは $1 \mu \text{ sec} / \text{div}$ にしてある。

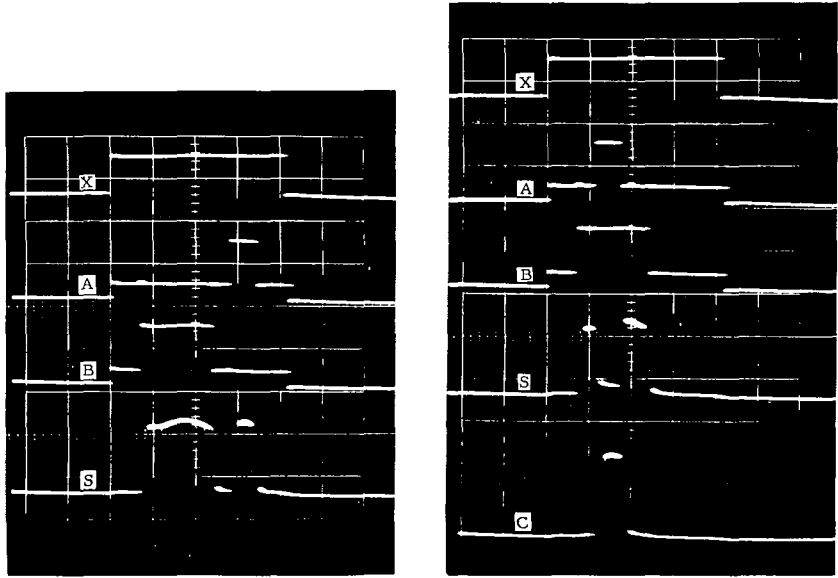


図 4.2

パルス電源に立上り 0.6 n sec のものを用い、時定数 0.1 n sec 程度の Si だれダイオードを試作して作った場合、出力波形は入力パルスに完全に follow することが認められた。

図 4.3 にはバイアス電流 1 アンペア流したときの入力電流とレーザ光の出力の関係を示してある。

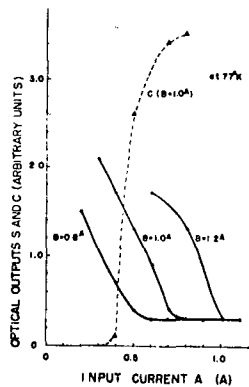


図 4.3

この素子を 18°K で動作させると連続発振して、動作中の消費電力は約 1 W であった。

§ 5 結 言

光結合を用いた超高速演算素子として半導体注入レーザ内の複数のモード間の相互作用を利用して発振出力の制御を行ない得るような、多電極レーザ素子について概要を述べた。

光計算機の演算装置は現在のゲートレジスタ方式とは全く異った二次元的な並列動作を主

体とするパターン認識のような方法が突然に出現する可能性を否定することは出来ない。然し現在実行可能なアプローチの一つの方法としてゲートレジスタ方式の論理回路を光結合回路に変換してその極限を探ることは必要である。

極限は素子内を光が走行する時間のみが propagation delay となるような機能回路素子であつて、ここで述べている注入レーザの functional device は原理的にはその極限に達する可能性をもっている。実用上の問題に関しても冷却を要する点は極低温発生装置の使用によって可能性の見通しをもつに至った。

終りに本研究の基本方針について御指示下さつた東北大学，和田，喜安両教授，及び研究の進行に当つて懇切に御指導戴いた西沢教授，又研究遂行に御配慮下さつた日電中研染谷所長，長船，佐藤，佐々木の諸博士，並びに基礎問題の処理と討議に尽力した米津氏及び素子の製作に協力した安岡氏に深甚な感謝の意を申し述べます。

参 考 文 献

- (1) A. Kawaji, "Some properties of junction triode laser," Japan J. Appl. Phys., vol. 3, p. 425 (1946)
- (2) 川路 昭 "複合型光半導体素子" 応物学会, 1964年3月
- (3) 長船, 川路 "半導体レーザとオプトエレクトロニクス" 電気化学会シンポジウム, 1964年11月
- (4) C. E. Kelly, "Interactions between closely coupled GaAs injection lasers," IEEE Trans. on E. D., vol. ED-12, p. 1, (1965)
- (5) M. I. Nathan, et al., "GaAs injection laser with novel mode control and switching properties," J. Appl. Phys., vol. 36, p. 473 (1965)
- (6) A. Kawaji, et al., "Single-filamentary junction laser," Japan. J. Appl. phys., vol. 4, p. 1024 (1965)
- (7) 川路, 米津, 安岡 "半導体レーザのモード制御" 電通学会シンポジウム, 1965年11月
- (8) 石田, 佐々木, 西沢 "半導体レーザの相互作用" 電通学会シンポジウム, 1965年11月
- (9) N. G. Basov, et al., "GaAs p-n junction laser with nonuniform distribution of current," Fizika Tverdogo Tela, vol. 7, p. 3128 (1965)
- (10) 川路, 米津, 安岡 "複合型光半導体素子II" 応物学会, 1965年4月
- (11) 川路, 米津, 安岡 "半導体レーザのモード制御II" 電通学会, 1965年4月
- (12) A. Kawaji, et al., "Double quenching on a selective diffused junction laser," Japan. J. Appl. phys., vol. 5, p. 340 (1966)
- (13) G. Lasher, et al., "Spontaneous and stimulated recombination radiation in semiconductors," Phys. Rev., vol. 133, p. A 553 (1964)
- (14) G. Lasher, "Analysis of a proposed bistable injection laser," Solid-State Electronics, vol. 7, p. 707 (1964)

- (15) F. Stern, "Effect of band tail on stimulated emission of light in semiconductors," Phys. Rev., vol. 148, P. 186(1966)
- (16) A. Fowler, "Quenching of gallium arsenide injection lasers," Appl. Phys. Lett., vol. 3(1963)
- (17) K. Konnerth, et al., "Delay between current pulse and light emission of a gallium arsenide injection laser," Appl. Phys. Lett., vol. 4, p. 120(1964)
- (18) 中野, 佐々木, 西沢 "半導体アイソレータ" 電通学会誌, 4月
- (19) W. F. Kosnosky, "Laser digital devices," Optical and Electrooptical Information Processing, M. I. T. Press, p. 269 (1965)
- (20) J. Nishizawa, et al., "Effect of roughening cleaved surfaces on the characteristics of GaAs injection laser diodes," Appl. Phys. Lett. vol. 6, p: 115 (1965)
- (21) 特許273217, 渡辺, 西沢 "半導体メーザ" (出願32年4月)

審査結果の要旨

半導体レーザーは位相の揃った連続的な光の波を高能率で発生できる装置で、高速でオン・オフができ、増幅が行えると共に光の照射によって放射する光が変化する性質があるので論理演算素子としての応用も注目されている。

本論文は、いちはやく、これ等の点に着目して半加算器をはじめ数種の論理演算素子の試作を行い、その動作速度は 10^{-10} sec より高速であるとの測定結果を得、同一動作電流の条件の下に現在のトランジスタ論理回路の最高速のものに比較して、約10倍動作速度を向上し得ることを結論し、半導体レーザー論理演算素子の将来性を決定付けたものであるといえる。

本論文は6章よりなる。

第1章は序論であって、従来までのこの分野における研究の概要と電気的な集積回路方式との見通しの比較および本研究の概要について述べている。

第2章では半導体レーザー・ダイオードをバンド理論を用いて説明し、論理演算動作機構をのべ、特に照射する光と放射する光の波長の間に関係があることを導いている。

第3章は前章で展開した理論に物性定数を導入して具体的な設計を行なったもので、いろいろの不純物密度をもった砒化ガリウムのレーザー・ダイオードについて、論理演算動作をさせるために流さなければならない最少の電流が温度が変るとどうなるかという関係と温度が上がったときにおこる熱放散がレーザー・ダイオードの中の消費電力とつり合わなければならないという関係から最適使用温度を求めた。更に電流密度と放出される光の波長との関係式を導いて、前章での波長に関する関係式によって論理演算素子の設計方法を得、これを応用して試作すべき論理演算素子の構造の決定をしている。

第4章は、半導体レーザー論理演算素子の製造方法、照射ダイオードと放射ダイオードとの電気的相互結合などの障害を打開する方法およびその実施結果を述べたものである。

第5章は測定方法および測定結果を述べたものであって、実現した数種の論理演算素子が設計通りの動作をすることを示し、さらに諸種測定結果とそれに現われた2,3の問題点について検討を行なっている。

第6章は結論である。

以上、本論文は、はじめて半導体レーザー論理演算素子の設計理論を作り、それによって新しい数種の論理素子の試作に成功し、更に製造方法の開発を行なって将来の超高速電子計算機に重要な方法であることを結論付けたもので、電子工学に重要な知見を加えたものである。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。