



| | |
|------------------|---|
| Title | 干渉縞変位に基づく光並列デジタル演算 |
| Author(s) | 今井, 洋; Imai, Yoh; 大塚, 喜弘 他 |
| Citation | 北海道大學工學部研究報告, 130, 113-119 |
| Issue Date | 1986-03-25 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/41974 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 130_113-120.pdf |



干渉縞変位に基づく光並列デジタル演算

今井 洋* 大塚 喜弘*

(昭和 60 年 11 月 20 日受理)

Optical Parallel Digital Computing Based on Fringe Shifting

Yoh IMAI and Yoshihiro OHTSUKA

(Received November 20, 1985)

Abstract

Optical digital computing method based on the shifting of an optical interference fringe is proposed. An interference fringe offers a periodic intensity distribution available for an optical binary output. Nonlinear processing is performed by using a photorefractive device which transforms input intensity into the phase change and, then, into the fringe shift.

The shifting of the output fringe corresponding to two binary optical inputs provides an optical logic operation in parallel. The present method is characterized by (1) the multiple output scheme of logic gates by dividing the output fringe, and (2) the implementation of the complementary logic outputs between the initially dark and bright region of the output fringe. The number and type of the logic operation are programmable by adjusting either the division or the shift of the fringe.

1. はじめに

近年、光の物理的性質である高速性、並列性、信号間非干渉性に着目した光並列デジタル演算やそれに基づく光コンピューターがにわかに注目されてきた¹⁻³⁾。これは現在の電子計算機の性能向上の有効な 1 方式として考えられているパイプライン方式やアレイプロセッサ方式等の並列計算方式が、光の性質、及び、光学の分野で発展して来た光情報処理の概念と非常にうまく結びつくことに起因する。しかしながら、光コンピューターの実現には不可欠である演算データを並列のまま扱える光メモリーや大規模な光演算システムで必要となる光増幅器、さらにはデータ間や光システム間の連絡に必要な光インターコネクションなどまだまだ解決すべき問題も多い。

そのような中で、まず第 1 の段階は光デジタル演算の基礎である光並列論理演算法の確立である。これには光入力に対して非線形処理が必要となり、これまで光情報処理や光デバイスの立場から種々の提案がなされている。それらを大別すると

- 1) 光入力の空間的符号化及び復号化技術を用いた方式⁴⁻⁶⁾
- 2) 光入力を非線形光学素子を用いて変調する方式⁷⁻⁹⁾

となる。いずれの方式も光の並列性を重視しているが、1) に関しては有効な実時間符号化技術が欠如し、2) に関しては、光有機非線形材料¹⁰⁾ など有望視されている材料があるものの高速性

* 数物系共通 工業力学第一講座

や高い並列度を十分に満たせないという状況にある。

本報告では、まず、この光並列論理演算に関して光の干渉に着目した新しい方法を提案する。光の干渉は、光情報処理や光計測の分野において最も有用な現象の1つであるが、これを非線形光学処理の立場から見ると興味深い。すなわち、干渉縞の周期的強度分布は、その並列変位により非線形な光出力として利用しうる^{11,12)}。このためには、光入力を干渉縞変位に変換するための非線形光学材料と干渉縞出力に対する復号処理が必要となる。したがって、方式としては先述の1)と2)との両方を組み合わせた方式といえる。次に、この干渉を利用した光並列論理演算法の応用とそれに基づいた光並列デジタル演算システムのアーキテクチャーについて述べる。

2. 干渉縞変位に基づく光並列論理演算

2.1 演算原理

光並列論理演算を実行するための干渉光学系を概念図を図1に示す。光学系はマッハツェンダー型干渉システムを構成しており、読み出し光と参照光とで出力面に干渉パターンを形成する。読み出し光は非線形光学素子 (SLM) を透過し、この素子上に光入力が照射する。素子では光入力に応じて屈折率変化が生じ、読み出し光の位相が変化する。したがって、出力面では干渉パターンが変位し、強度分布が周期的に変化し、光入力に対し非線形な処理が可能となる。ここで、光入力と光素子間、及び、光素子間と干渉縞出力面間は、処理されるデータ間の1対1対応を満たすために結像光学系により結ばれているものとする。この原理に従い、2値2入力に対する論理演算が、干渉縞出力の暗部を“0”、明部を“1”として容易に実行される。

2値2変数入力に対し可能な16個の正論理 (PTL) における論理演算出力を表1に示す。初期状態として出力面で一様な干渉パターンが形成されている場合、光入力の1画素に対応した領域での強度変動はその画素内で一様となり、単一の論理演算が空間的に並列に実行される。一方、出力面において入力1画素に干渉縞1周期が対応するように空間的に周期的な干渉縞出力を設定するとさらに高度な演算が可能となる。すなわち、干渉縞出力の暗部と明部とに着目することにより、互いに相補的な論理演算が同時に実行される。それぞれの光入力による位相変化を等しく

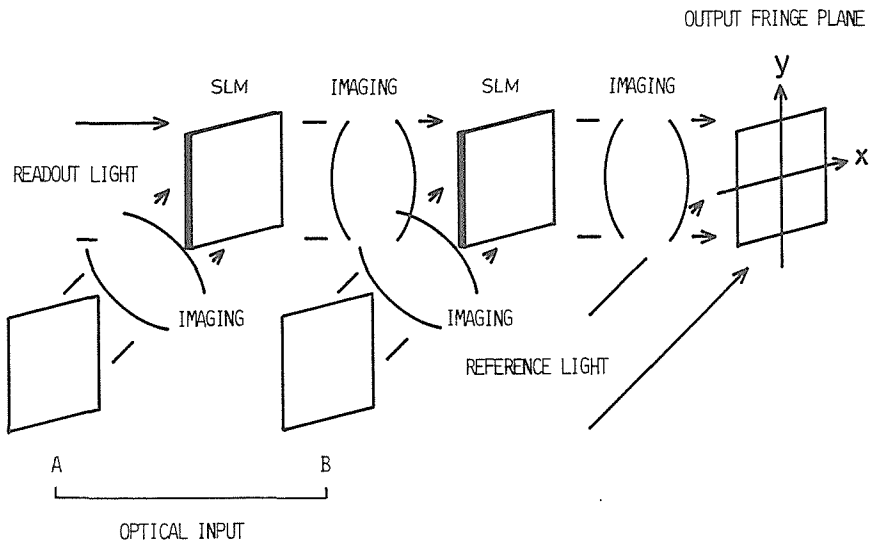


図1 干渉に基づく光演算システムの概念図

表1 2変数2値論理関数

| INPUT | | OUTPUT | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|---|--------|-----|-------------------|---|-------------------|---|-----|----|-----|------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|------------------|----|
| A | B | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Function in PTL | | F | AND | $A \cdot \bar{B}$ | A | $\bar{A} \cdot B$ | B | XOR | OR | NOR | \overline{XOR} | \bar{B} | $A + \bar{B}$ | \bar{A} | $\bar{A} + B$ | \overline{AND} | T |

(\cdot : AND, $+$: OR, $\bar{}$: Negation, T : True, F : False)

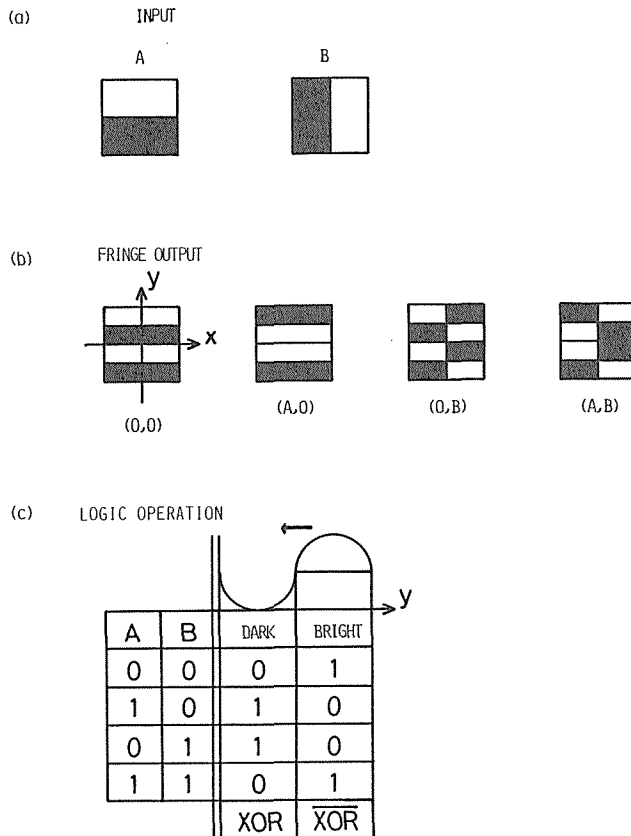


図2 2値2光入力(a)に対する干渉縞出力の変位(b)とそれによって実行される論理演算(c)

π とした場合の1例を図2に示す。この場合、それぞれの入力の“1”に対して干渉縞の強度分布は反転し、さらに両入力による位相変化は加算されるので、初期状態の暗部と明部でそれぞれ排他論理和 (XOR) とその否定 (\overline{XOR}) が同時に実行されることになる。

2.2 多重論理演算

読み出し光に誘起される位相変化に対応して干渉縞出力を空間的に分割すると、多重論理演算が可能となる¹²⁾。ただし、出力の2値(0, 1)を保障するために、一般に干渉縞に対するしきい値検出が必要となる。得られる多重論理演算の例を図3に示す。a) は、それぞれの光入力に

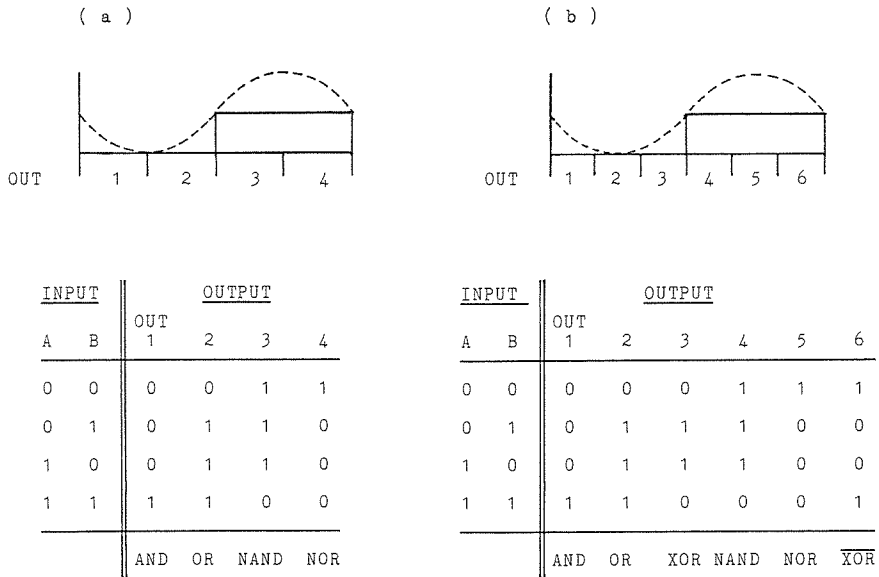


図3 干渉縞変位を用いた多重論理演算

し $\pi/2$ の位相変化が与えられる場合で、干渉縞出力 1 周期を 4 分割した各位置で 4 種類の論理演算が、b) では、 $2\pi/3$ の位相変化に対し、6 分割した各位置で 6 種類の論理演算が同時に実行される。

これまででは、それぞれの光入力に対し等しく与えられる位相変化について扱ってきたが、次に異なる位相変化の場合を考える。この場合、2 値 2 入力に対して 4 つの干渉縞変位の状態が生じ、したがって、暗部と明部とでそれぞれ 4 分割することによりこの方法で同時に可能な最大 8 種類の論理演算が実行される。たとえば、位相変化が各入力に対し $\pi/2$ と $2\pi/3$ とすると、暗部を 4 分割した各位置で AND, B, OR, XOR 演算が、明部を 4 分割した各位置ではそれらの否定が同時に実行される。以上述べてきた位相変化の設定は一例を示しており、所望の論理演算出力群を得るには一般に複数の設定が可能である。また、干渉縞出力面での分割に対応した空間的復号(デコーディング)マスクにより複数の論理演算の選択的実行が可能となる。

このような干渉を用いた光並列論理演算に基づいて光演算システムを構成する場合、その並列性は SIMD (Single Instruction, Multiple Data) に従った、特にその多重演算性は MIMD (Multiple Instruction, Multiple Data) に従ったアーキテクチャーの実現に適用されうる。

2.3 光並列半加・減算器への応用

光半加算器は、各桁の和の結果 (S) とキャリィ (C) とから成り、それぞれ論理演算の XOR と AND 出力を用いて構成される。先に述べた干渉を用いた多重論理演算法を用いると容易にこれらの出力が得られる。図 3 b) を例にとると、干渉縞出力面での分割位置 1 と 3 とにおいて AND と XOR が同時に実行され、1 つの干渉システムで光半加算器が構成される。この場合、光入力 1 画素に対応した干渉縞出力 1 周期において、復号マスクは分割位置 1 と 3 のみを透過させる設定となる。

一方、半減算器は各桁の差の結果 (S) とボロー (B) とから成り、それぞれ XOR と $\bar{A} \cdot B$ 演算により与えられる。これらの論理演算を同時に実行するための位相変化の設定例は、2 入力に対しそれぞれ $2\pi/3$ と $4\pi/3$ である。この場合、干渉縞出力 1 周期の暗部を 3 分割した各位置で

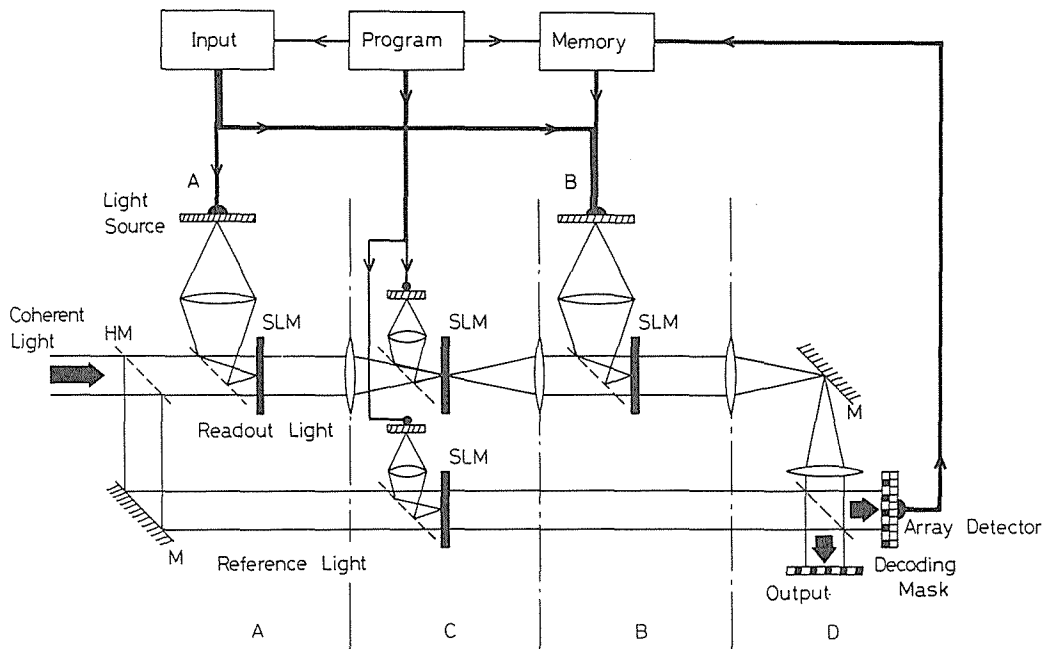


図4 干渉に基づく光並列デジタル演算システム

$\bar{A} \cdot B$, XOR, $A \cdot \bar{B}$ が得られ、明部ではこれらの否定演算が得られる。したがって、出力位置の 1 を B, 2 を S として光並列減算器が構成される。

3. 干渉を用いた光演算システムのアーキテクチャー

3.1 光並列演算システム

前節では光並列論理演算について述べたが、コンピューターとしてさらに高度な演算を実行するには、他に並列シフト演算、近傍画素間演算、順序論理演算等が必要となる。これらを考慮した光学システムの構成を図4に示す。システム中、A及びBのユニットは光入力部で、LEDアレイやフィルム等によって2値の強度パターンが入力される。LEDアレイの場合は各素子の発光状態が、フィルムの場合は透過率分布が光並列入力となり、非線形光学素子、あるいは、光空間変調素子 (SLM) へは結像光学系を経て伝播する。Cのユニットはシフト演算や、近傍演算用で、SLMへの外部照射光の制御により実行される。ここに組み込まれた SLM は両入力部の SLM のちょうどスペクトル面に位置する。したがって、たとえば並列シフト演算は SLM 面内の1方向に対し増加する強度分布の照射光により、SLM内では屈折率分布に空間的な勾配が生じ、その結果、出力面ではその方向に並列シフトした像が得られることにより実行される。この場合、外部照射光光源はやはり LEDアレイなどが用いられ、また、読み出し光側と参照光側と与えられるシフト量は等しくする必要がある。近傍演算は、この並列シフト演算を用い、1画素分ずつ2次元的なシフトを繰り返しそれらの結果を重ね合わせることにより実行される。Dのユニットは順序論理演算用である。ちょうどマッハツェンダー型干渉システムであることにより得られる2つの干渉縞出力のうち一方を利用してフィードバック系を構成できる。

このような並列処理システムを用いると、単一論理ゲートでシステムを構成する場合に比べ大幅に使用する素子数を減らすことができ、処理速度の改善や、さらには中間処理結果の利用等も

容易に行なえることになる。

3.2 プログラマビリティ

並列演算を高度な処理に応用するためには、SIMD, あるいは MIMD に従ったシステムの制御, 及び, プログラミングが必要になる。カルコゲナイドガラスを SLM として用いた場合を例にとると, 光誘起屈折率変化の大きさは照射する入力光強度に依存するので, まず, 入力光強度の全体的制御により論理演算のプログラミングが可能となる。また, 多重演算の制御はこの入力光強度の制御と干渉縞出力面における復号マスクの操作により実行される。さらに, 並列画像処理等が必要となるシフト演算は外部照射光光源の強度分布の制御により可能となり, これらの制御方法を並用することによりある程度のプログラミングが可能となる。

3.3 非線形光学素子材料

現在のところ, 実時間で書き込み及び消去可能な光入力一位相変化変換素子としては, 非線形光学結晶 (BSO, KDP 等), 液晶ライトバルブ, サーモプラスチック, カルコゲナイドガラス, さらに, これらの材料と光電変換素子とを組み合わせた光空間変調素子 (SLM) などがある。これらの代表例を表 2 に示す^{13,14)}。これらの素子には, 一般に感度が悪い, 時間応答が遅い, などの性能上の問題やコストの問題があり, 光演算システムの構成には十分とは言えない。しかしながら, 我々がこれまで用いて来たカルコゲナイドガラスを例にとると¹⁵⁾, 大きさ $1 \times 1 \text{ cm}^2$ の素子に対し, 出力面では $10^{11}/\text{sec}$ の割合で並列演算が実行されることになる。このことは, 演算の並列性, 特に空間的な分解能に着目すれば, 現在の超大型電子計算機をはるかに上まわる性能が容易に実現できることを意味している。

非線形光学素子の利用法としては, 複屈折性を利用して読み出し光に偏光面の回転を与える非線形処理なども他に考えられており, 干渉のみならず種々の光の性質を組み合わせた演算法も考えられる⁹⁾。

表 2 おもな光空間変調素子の性能

| 材 料 | 感度(mJ/cm ²) | コントラスト | 解像度(lp/mm) | 時間応答 |
|------------|-------------------------|-----------------|------------|--------------------|
| BSO | 10^{-3} | 5×10^3 | 100 | $\sim \mu\text{s}$ |
| KDP | 10^{-2} | 50 | 50 | $10 \mu\text{s}$ |
| PLZT | 10 | 30 | 50 | $\sim \text{s}$ |
| 液 晶 | 10^{-3} | 100 | 50 | 20ms |
| サーモプラスチック | 10^{-1} | 100 | 10^3 | $< \text{s}$ |
| カルコゲナイドガラス | 10^3 | — | $> 10^3$ | $\sim 10\text{ms}$ |

4. おわりに

以上, 周期的な強度分布を有する干渉縞のシフティングに基づいた光並列論理演算法とこれを用いた光演算システムのアーキテクチャーについて提案し, 検討した。干渉システムの構成としては, ここで述べた以外に, 干渉する 2 つの光ビームそれぞれに光入力を照射する SLM を配置したシステムも可能である。この場合, 干渉縞出力は互いの入力に対し反対方向にシフトすることになり, したがって同じ位相変化の設定に対しても異なった多重論理演算が実行されることになる。本方法で用いたマッハツェンダー型干渉システムでは, 互いに相補的な干渉縞出力が必然的に同時に得られるので, フィードバック系の構成等に利点があるという特長を有する。また, 干渉を用いた光演算法をまとめると次のようになる。

- 1) 光入力の特種な符号化は必要なく 2 値の光入力パターンを直接利用可能。
- 2) 干渉縞出力の分割検出により多重論理演算が可能。
- 3) 演算の高精度化のため干渉縞出力に復号マスクングとしきい値検出が必要。
- 4) 一般的な SLM を用いた場合、読み出し光と光入力とで 2 色光による操作が必要。

さらに高度な光コンピューターの構成には、2 次元あるいは 3 次元配列のデータをそのまま扱える記憶素子や光演算システム間などの連絡に必要な光インターコネクションなどが重要な問題となってくる。これらに関しては、現在、光バスタビリティやホログラフィを用いた方法の研究などが電子計算機のそれとは全く異なる概念に基づいて進められている。この他光コンピューターに関する研究はデバイス、アーキテクチャーの両面から種々の提案がなされ始めたところであり、超高速光コンピューターの実現が期待される。

謝 辞

本研究を行なうにあたり有益な御討論を頂いた今井正明助教授、ならびに田中啓司講師に感謝します。また、本研究の一部は文部省科学研究費の援助により行なわれたことを附記する。

参考文献

- 1) J. Jahns : *Optik*, 57 (1980), 3, P. 429.
- 2) 石原聡, 島田潤一, 桜井健二郎 : *電子通信学会誌*, 64 (1981), 1, P. 89.
- 3) 一岡芳樹 : *応用物理*, 54 (1985), 10, P.1020.
- 4) A. Huang : *Proc. 10th IOCC*, (1983), P. 13.
- 5) J. Tanida and Y. Ichioka : *J. Opt. Soc. Am.*, 73 (1983), 6, P. 800.
- 6) H. Bartelt, A. W. Lohmann, and E. E. Sicre : *J. Opt. Soc. Am. A*, 1 (1985), 9, P. 944.
- 7) M. T. Fatehi, K. C. Wasmundt, and S. A. Collins, Jr.: *Appl. Opt.*, 20 (1981), 13, P. 2250.
- 8) B. K. Jenkins, A. A. Sawchuk, T. C. Strand, R. Forchheimer, and B. H. Soffer : *Appl. Opt.*, 23 (1984), 19, P. 3455.
- 9) T. Minemoto, K. Okamoto, and K. Miyamoto : *Appl. Opt.*, 24 (1985), 14, P. 2055.
- 10) 梅垣真祐 : *応用物理*, 54 (1985), 2, P. 137.
- 11) Y. Imai, Y. Ohtsuka, and K. Tanaka : *Opt. Quant. Electron.*, 17 (1985), 2, P. 119.
- 12) Y. Imai and Y. Ohtsuka : *Opt. Eng.*, 25 (1986), 1, p. 98.
- 13) 西原 浩 : *テレビジョン学会誌*, 36 (1982), 12, P. 1068.
- 14) 窪田恵一, 西田信夫 : *光学*, 14 (1985), 1, P. 19.
- 15) K. Tanaka, Y. Imai, and A. Odajima : *J. Appl. Phys.*, 57 (1985), 11, P. 4897.