

## 研究

## 半導体レーザー直接変調による波面計測ヘテロダイン干渉計

立野 公男・角田 義人

(株)日立製作所中央研究所 〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

(1986年9月5日受理)

## A Diode Laser Direct Modulation Heterodyne Interferometer

Kimio TATSUNO and Yoshito TSUNODA

Hitachi Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.,  
1-280, Higashi-Koigakubo, Kokubunji 185

A new type of heterodyne interferometer was realized through direct modulation of a diode laser wavelength. A measurement accuracy of better than  $\lambda/50$  and repeatability of  $\lambda/100$  were obtained. This interferometer shows promise for use in testing wave front aberrations, especially in optical disc systems.

## 1. はじめに

光ディスクやレーザープリンタなど高精度光学系では、構成部品の波面精度として  $\lambda/10 \sim \lambda/15$  のオーダーが必要である。これらの光学系の光源には、半導体レーザーが使われており、この波長での波面計測が最近とみに要求されてきている<sup>1-4)</sup>。それは、市販干渉計の光源が通常 He-Ne レーザーであり、半導体レーザーとの波長差による色収差の問題が避けられないからである。

一方では位相変調ヘテロダイン(縞走査)干渉法が著しい進歩をとげており、干渉縞の強度分布を電気信号に変換し干渉縞を  $\lambda/100$  という非常に高い精度で読み取り、コンピュータ処理する方法が確立されてきている<sup>5-9)</sup>。

しかし、位相変調ヘテロダイン(縞走査)干渉法では、従来から位相を変調するのに通常ピエゾ素子(電歪素子)が使われており、その非線形性、ヒステリシス、高電圧動作などの欠点があり、これが測定精度向上のネックの一つとなっている<sup>4)</sup>。また、ミラー等の基準盤を機械的に振動させて位相変調を行なうため、たとえばフィゾー型の干渉計などでは、透過平面基準盤のサイズに制限が加わることになる。

本論文は、半導体レーザーを光源とした干渉計において、注入電流を直接変調し、これに伴う波長の線形変化から生じる干渉縞の自動走査を利用して波面を計測する

新しいタイプのヘテロダイン干渉法について述べるものである。この方法では、通常の位相変調サブフリンジ干渉計から機械的駆動部分をまったく取り除くことができ、しかも、高い変調周波数特性があるため、瞬時測定の可能性があり、より高い測定精度と、測定対象の大口径化が期待されるものである。

以下、その動作原理を理論、実験両面から解析し、試作した干渉計による測定例として、光ディスクヘッドの波面計測について述べる。

## 2. 動作原理

## 2.1 半導体レーザーの波長変調

半導体レーザーの場合には、注入電流によって、位相を直接変調することができる。すなわち  $\alpha$  を定数として注入電流を時間的に線形に

$$\Delta i = \alpha \cdot t \quad (1)$$

と変化させたとき、発振波長はわずかにシフトする。すなわち

$$\begin{aligned} \Delta \lambda &= \beta \cdot \Delta i \\ &= \alpha \cdot \beta \cdot t \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $\beta$  は半導体レーザーに固有の定数である。以下、波長変調に関する諸式を導いておく。レーザーの共振条件は

$$\lambda = (2/m)nL \quad (3)$$

で与えられる。ここに  $n$  は屈折率,  $L$  は共振器長,  $m$  は整数である。いま, 注入電流をわずかに  $\Delta i$  だけ変化させると, 共振器の温度が  $\Delta T$  だけ変わる。  $R$  を熱抵抗としたとき

$$\Delta T = R \cdot \Delta i \quad (4)$$

である。これに伴う波長の変化量  $\Delta \lambda$  は式(3)の微分から

$$\Delta \lambda = (2/m) \left( L \cdot \frac{\partial n}{\partial T} + n \cdot \frac{\partial L}{\partial T} \right) \cdot \Delta T \quad (5)$$

となる。共振器長の温度変化  $\partial L / \partial T$  は屈折率の温度変化に比べ小さいので, 式(4), (5)から

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda}{n} \frac{\partial n}{\partial T} R \cdot \Delta i \quad (6)$$

が得られる。つまり, 式(2)で与えた定数  $\beta$  は, 発振波長  $\lambda = 780 \text{ nm}$ , 屈折率  $n = 3.5$ , 屈折率の温度係数  $\partial n / \partial T = 4 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$  として半導体レーザーの熱抵抗<sup>10)</sup>  $R \approx 0.07^\circ\text{C}/\text{mA}$  によって表わされ,

$$\beta = \frac{\lambda}{n} \frac{\partial n}{\partial T} R \approx 6 \times 10^{-3} \text{ (nm/mA)} \quad (7)$$

となる。この定数  $\beta$  は, 別の方法, たとえば分光器を使って, 注入電流対波長のデータをプロットすることによりその傾きから求めることができ, 3章でその結果を述べる。

## 2.2 直接変調による波面計測ヘテロダイン干渉計<sup>11,12)</sup>

以下の諸式により, 半導体レーザー注入電流直接変調によるヘテロダイン信号の生成と, 波面計測について解析する。一般に, 二光束干渉計では, 物体波面の参照波面に対する位相  $\Phi(x, y, t)$  は

$$\Phi(x, y, t) = 2\pi \Delta l / \lambda \quad (8)$$

で与えられる。ここに  $\Delta l$  は二光束の光路差,  $\lambda$  は波長である。通常のヘテロダイン干渉計(あるいは縞走査干渉計)では, ピエゾ素子により, ミラー等を振動させて光路差  $\Delta l$  を変調する方法をとっている。しかし, 半導体レーザーを光源とした場合には, 先述のように位相は直接変調可能である。すなわち, 参照波面に対する初期位相を  $\Phi_0$ , 初期波長を  $\lambda_0$ , 位相シフトを  $\Delta \Phi$  としたとき,

$$\begin{aligned} \Phi(x, y, t) &= 2\pi \Delta l / \lambda_0 - (2\pi \Delta l / \lambda_0^2) \cdot \Delta \lambda \\ &= \Phi_0 - \Delta \Phi \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta \Phi &= (2\pi \Delta l / \lambda_0^2) \beta \cdot \Delta i \\ &= 2\pi f t \end{aligned} \quad (10)$$

と書くことができる。すなわち, 干渉縞が, 注入電流の変化  $\Delta i$  に伴い, 周波数  $f$  で自ずから走査することになる。ここに

$$f = (2\pi \cdot \Delta l / \lambda_0^2) \alpha \cdot \beta \quad (11)$$

である。走査の周波数  $f$  は, 光路差  $\Delta l$ , 初期波長  $\lambda_0$ , 駆動回路の定数  $\alpha$ , そして半導体レーザーに固有の定数  $\beta$  により決定される。

一般に, 二光束が干渉したときの干渉縞の強度分布

$$I(x, y, t) \text{ は, } \gamma \text{ をビジビリティ係数として} \quad (12)$$

$$I(x, y, t) = I_0 [1 + \gamma \cos \{\Phi(x, y, t)\}] \quad (12)$$

で与えられる。われわれの半導体レーザーヘテロダイン干渉計では, 干渉縞は二次元 CCD 上に投影結像される。いま, CCD 上の一つのエレメントに着目すれば, そこに流れる光電流  $i_p(x, y, t)$  は正弦波的に変化し,

$$i_p(x, y, t) = i_0 [1 + \gamma \cos \{\Phi(x, y, t)\}] \quad (13)$$

$$\Phi(x, y, t) = \Phi_0(x, y) - 2\pi f t \quad (13)$$

と書ける。この光電流は一種のヘテロダイン信号とよんでおり, 半導体レーザーの注入電流を直接変調して得られたものである。

以上の方法を, Wyant らが提唱する Bucket 法<sup>9)</sup> に適用して, 初期位相分布すなわち波面  $\Phi_0(x, y)$  を求めることを考えると, 干渉縞がちょうどフリンジだけシフトするのに必要な注入電流の変動分  $\Delta i$  を決めなければならない。すなわち, 式(10)において, 位相シフト分を  $2\pi$  に等しいと置いて,

$$\Delta i = \lambda_0^2 / \beta \cdot \Delta l \quad (14)$$

で与えられる。この関係は, 3.2 節において, 実験的に検証するものとする。

## 3. 実 験

### 3.1 波長変調

Fig. 1 は半導体レーザーの発振波長と注入電流との関係を示すものであり, 分光器によって測定したデータである。波長が不連続に変化するのには, 半導体レーザーのモードホップによる。しかし, おおのこのモードホップ間には, 波長が注入電流に対して線形に変化する安定な場所があることに気づく<sup>13)</sup>。この線の傾きから, 注入

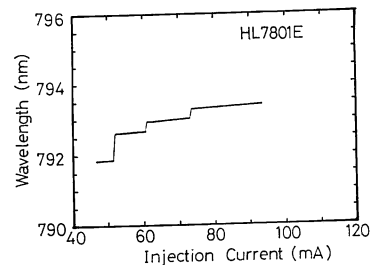


Fig. 1 Relationship between injection current and wavelength of a diode laser. There are stable regions between mode hopping steps.

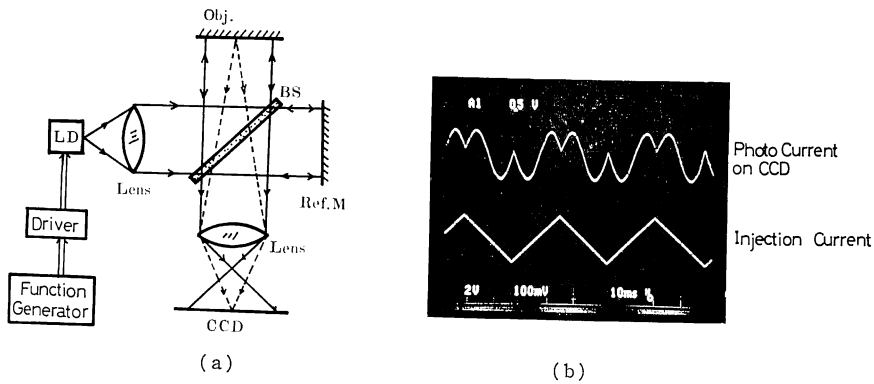


Fig. 2 Sinusoidal photocurrent (b) from the Twyman-Green interferometer, (a) for linearly modulated injection current(b).

電流に対する、波長の変化分を決める比例定数  $\beta$  が与えられ、

$$\beta \approx 6 \times 10^{-3} \text{ nm/mA}$$

となつて、式(7)で求めた値とよい一致を示している。

実験に使用した半導体レーザーは日立製単一モードレーザー (MCSP 型 HL 7801 E) で波長  $\lambda_0 = 780 \text{ nm}$ , 出力  $P_0 = 5 \text{ mW}$  である。

### 3.2 半導体レーザー直接変調ヘテロダイン干渉計

これまで述べてきた、ヘテロダイン信号の発生を実験的に確認する目的で、Fig. 2(a)に示したトワイマン・グリーン型の干渉計を導入した。光源からの二光束は干渉し、干渉縞は、二次元 (100×100) に並べられた CCD 上に結像されている。ここで、半導体レーザーの注入電流を直接変調すると、干渉縞が自分自身で走査を始める。この干渉縞の移動に伴い、CCD のおのおのの

エレメント上の光強度分布が変化する。その結果、式(13)で表わされるように、おのおののエレメントには、正弦波状の光電流が流れることになる (Fig. 2(b))。折り返り点か、被検波面の初期位相を意味しており、CCD の各エレメントごとに、この点から初期位相を求めれば、波面全体の位相分布が求められる。Fig. 2(b) の下の信号は、注入電流の変動量を示しており、振幅は、干渉縞がちょうど1フリンジ分移動するのに要する電流変化分に相当している。

Fig. 3 は、ちょうど1フリンジ分だけ干渉縞をソフトさせるのに要する電流変動分  $\Delta i$  と、干渉計の光路差  $\Delta l$  との関係をプロットしたものである。式(14)をあてはめれば、比例定数  $\beta$  として、 $6 \times 10^{-3} \text{ nm/mA}$  が得られ、分光器による測定によって得られた値、および理論的に計算した値、式(7)とそれぞれよい一致を示している。

図中、上の線は、マッハ・ツェンダー型などのシングルパス干渉計、下の線は、トワイマン・グリーン型、フィゾー型などのダブルパス干渉計に相当する。後者の場合、干渉計の各アームの長さの差が 100 mm のとき、注入電流の変動分は 0.5 mA である。これらの値は、通常の実験室で扱う干渉計のサイズからして、なんら無理のないものである。

### 3.3 測定系

Fig. 4 は、注入電流直接変調干渉計のシステム概略の一例を示すものである。ここでは、Wyant らによる四バケット法を適用している。干渉縞は、CCD 上に投影結像され、通常のピエゾ素子の代わりに、注入電流を直接変調する。先述のように、おのおのの CCD エレメントには正弦波状の光電流が流れる。おのおのの初期位相は、Zygo PM-2 プロセッサを通じ、四バケット法に

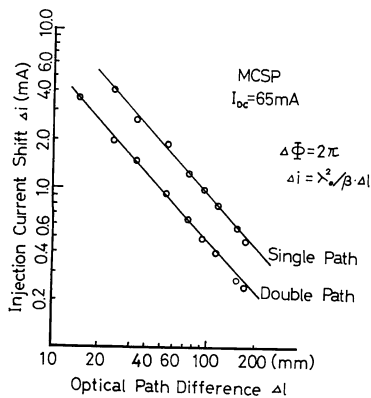


Fig. 3 Relationship between optical path difference,  $\Delta l$ , and injection current shift,  $\Delta i$ , necessary to attain one fringe shift. Upper line: single path interferometer, lower line: double path interferometer.

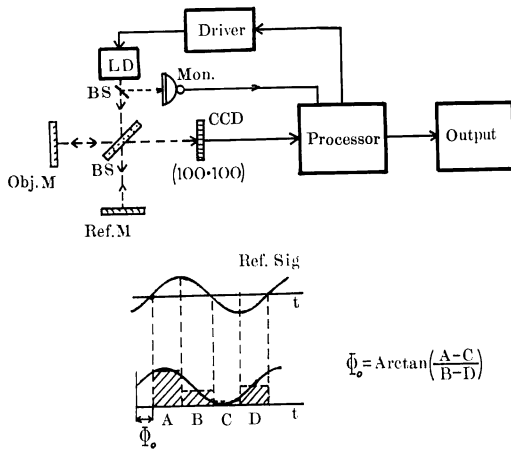


Fig. 4 Experimental setup of diode laser direct modulation heterodyne interferometer.

より決定され、被検波面全体が計測される。

測定時間は、50 ms と十分短く、温度ドリフトや振動などの影響を受けにくい。ちなみに、波長直接変調の周波数特性は数百 MHz に達するので、半導体レーザーのパワーに応じて、測定時間をさらに短くすることも可能であり、このことが、本方法の最も大きな特徴の一つとなっている。一方、半導体レーザーを高周波で駆動したとき、多モード発振となり、コヒーレンス長が低下する問題がある。しかし、この現象は変調の深さが、発振閾値以下に十分切り込むくらい深い場合であり、本方式のように変調の振幅が 0.5 mA 程度では単一モードを保持すると期待できる。この点、次の機会に明らかにしていきたい。

ここで、式(14)あるいは、Fig. 3 の結果から、干渉計の光路差が短くなると、1 フリンジ移動するための

電流変動分が増加し、これに伴う半導体レーザー出力の変化分が無視できなくなる。この場合には、出力光を第3の光検知器でモニターし、この値でヘテロダイン信号(13)を割算し、正規化することにより、より正確な測定を期することが可能である。

ところで、今回のわれわれの実験では、Wyant らによる四バケット法を適用したが、本直接変調方式は、これだけでなく、たとえば、Brunning らの digital 干渉法に適用可能であることはいうまでもない。

#### 4. 測定結果

##### 4.1 波面計測

Fig. 5 は例として、シリンダレンズを光路中に置いて発生させた双曲波面の計測を行なった結果である。左の写真は干渉縞、まん中は波面位相を読み取った結果を等高線表示したもの、右は三次元表示したものである。確かに鞍状をしており、正しく処理されたことがわかる。また、繰返し読取り精度は  $\lambda/100$  に達した。較正は He-Ne レーザーを光源とする干渉計であらかじめ測定した平面鏡により行ない、 $\lambda/50$  の精度を得ている。

##### 4.2 光ディスクヘッドの波面計測

Fig. 6 は、光ディスクヘッドの波面収差を測定するために工夫した改造型マッハ・ツェンダー干渉計<sup>1)</sup>である。マッハ・ツェンダー干渉計では、二光束それぞれ独立に取り扱うことができ、一方の光束中にビームエクパンダを置き、光束径を焦点距離の比だけ拡大する。いまレンズ  $L_1, L_2$  の焦点距離の比を 1 : 10 にとれば、拡大された光束の 1/10 の径の近軸波面を参照光にとることができる。非点収差の波面収差は光束径の自乗(1/100)で低減されることは収差論から明らかであり、参照光と

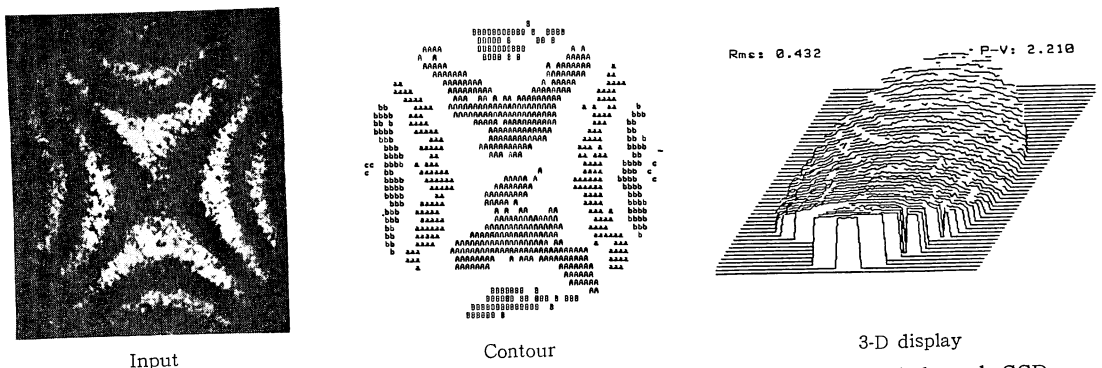
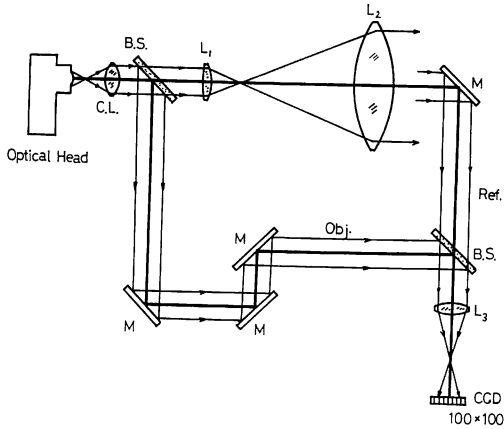


Fig. 5 Left: Interference pattern of a hyperbolic wavefront to be measured through CCD (100x100). Center: Contour map obtained by the diode laser direct modulation interferometry with the aid of a Zygo-Mark-III-PM-2 processor. Right: 3-D display.



**Fig. 6** Modified Mach-Zehnder interferometer<sup>1)</sup> for measurement of wavefront aberration of optical head. Two extra mirrors are used to obtain a proper optical path difference.

して十分な平面度をもつと考えることができる。もう一方の光束は、被検波面として、参照光と干渉し、被検波面の干渉縞を得ることができる。

ところで、光ディスクシステムのような回折限界域での波面収差の評価には、Maréchal の criterion<sup>14)</sup>が、一応の目安として、導入される。すなわち  $I$  をストレールの強度としたとき、

$$I = \{1 - (2\pi/\lambda)^2 E^2\} \geq 0.8$$

$$E \leq 0.07\lambda$$

と表わされ、 $\lambda$  は波長、 $E$  は波面収差の標準偏差 (RMS) である。いま、光ディスク自身と光ディスクヘッドとの互換性すなわち、どんなディスクも任意のプレーヤにかけうという自然な考え方に立てば、上の波面収差許容量はディスクとプレーヤに等分するのが妥当である。したがって光ディスクヘッドの波面収差許容量  $E_h$  は

$$E_h < 0.05\lambda$$

でなければならない。

たとえば、Fig. 7(a) の光ヘッドでは、Maréchal の criterion とほぼ同程度の値を示しているが、上述のシ

ステム全体の配分と考えれば、これをクリアしていない。実際、コマ収差による波面の凹凸が図から観察される。一方、光ヘッド (b) では、波面収差の標準偏差は  $0.05\lambda$  以下であり、光ヘッドとして十分な性能をもつと判定できる。

### 5. 結 言

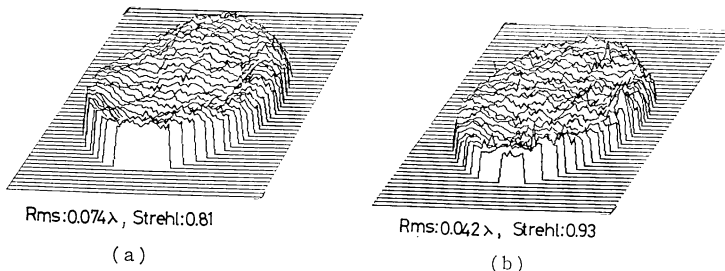
半導体レーザー波長直接変調による新しい型のヘテロダイン干渉計を開発し、波面計測を行なった。測定精度は  $\lambda/50$ 、繰返し精度は  $\lambda/100$  に達する。また、この干渉計を光ディスクヘッドの評価に適用し、光ディスクシステムのような、回折限界域での波面精度を要求する分野で重要な役割を演じることを確かめた。

実際に、本干渉計には、機械的駆動部が皆無のため、また、測定時間が、 $\mu s$  以下に達する可能性があるため、過渡現象の波面計測、あるいは、外乱や温度ドリフトの影響を受けにくい高精度かつ大口径の波面計測が期待されるものである。

本研究を遂行するにあたり、当研究所第 6 部堤善治部長からは数々の激励をいただき、また、同所主任研究員有本昭博士からは日常の議論を通じてさまざまな示唆を受けた。ここに感謝の意を表明する。

### 文 献

- 1) K. Tatsuno and A. Arimoto: "Measurement and analysis of diode laser wave front," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 3520-3525.
- 2) L. Arque: "Semiconductor lasers wavefront," *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.*, Cannes, France (1982) pp. 183-186.
- 3) D. van Eck: "Wavefront measurements on semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-19** (1983) 966-968.
- 4) J. Hayes and S. Lange: "A heterodyne interferometer for testing laser diodes," *SPIE Proc.*, **429** (1983) 22-26.
- 5) 中島俊典: "ヘテロダイン干渉法", *光学*, **9** (1980) 226-274.
- 6) 武田光夫: "サブフリンジ干渉法", *光学*, **13** (1984) 55.



**Fig. 7** Examples of measured wavefronts for optical disc heads.

- 7) 谷田貝豊彦: "光学表面の評価と形状測定", 第12回冬期講習会テキスト (1986).
- 8) J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White and D. J. Brangaccio: "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses," *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693.
- 9) J. C. Wyant: "Use of an ac heterodyne lateral shear interferometer with real-time wavefront correction systems," *Appl. Opt.*, **14** (1975) 2622.
- 10) W. B. Joyce and R. W. Dixon: "Thermal resistance of heterostructure lasers," *J. Appl. Phys.*, **46** (1975) 855-862.
- 11) K. Tatsuno and Y. Tsunoda: "Diode laser heterodyne interferometer using direct modulation of wavelength," *Tech. Dig. of CLEO '85*, Baltimore (1985) p. 266.
- 12) K. Tatsuno and Y. Tsunoda: "A diode laser direct modulation heterodyne interferometer," *Appl. Opt.* (to be published).
- 13) S. Noda, K. Kojima, K. Mitsunaga, K. Kyuma and T. Nakayama: Ridge waveguide AlGaAs/GaAs distributed-feedback lasers with a multiple-quantum-well structure," *Tech. Dig. of CLEO '86* (1986) p. 224.
- 14) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 3rd Rev. Ed. (Pergamon Press, Oxford, 1965) p. 469.