

四重光路マイケルソン光干渉計方式熱膨張計 nano-LIX型

前田幸男*

1. はじめに

あらゆる物質はその温度が変わると体積が変化する。ある温度 T_1 における体積を V_1 とし、温度が T_2 ($T_2 > T_1$) に変化したときの体積を V_2 とするとき、本稿では $(V_2 - V_1) / V_1$ を体膨張率とよぶ。また、これを単位温度当たりの係数で表わすとき $(V_2 - V_1) / V_1 (T_2 - T_1)$ を体膨張係数 α_V とよぶ。通常、三次元の体積膨張より一次元の線膨張のほうが測定が容易であるため、線膨張率、線膨張係数 α_l を測定することが多い。これらは温度 T_1, T_2 における長さを L_1, L_2 とするとき、それぞれ $(L_2 - L_1) / L_1, (L_2 - L_1) / L_1 (T_2 - T_1)$ である。厳密には T_2 を限りなく T_1 に近づけた極限值を温度 T_1 における線膨張係数と呼ぶべきとされるが、現実には有限の温度幅を用いて表現する機会が多い。また、初期長 L_1 の代わりにたとえば室温における長さ L_0 等が用いられる場合もある。この場合、 $\alpha_l = (L_2 - L_1) / L_0 (T_2 - T_1)$ である。

熱膨張率、線膨張係数は基本的熱物性値であると共に、工学的にも極めて重要な量である。なお一般に線膨張係数は大変小さく、 $\alpha_V = 3 \alpha_l$ としてよい。

さて線膨張率、係数を測定するのは熱膨張計と呼ばれる測定装置だが、最も多く見られる熱膨張計は押し棒式熱膨張計である。これは径 5 mm × 長 15 mm ~ 径 20 mm × 長 100 mm 程度の円柱状試料を用い、加熱による熱膨張を試料に接触する押し棒の移動量によって測定するもので、 $0.1 \mu\text{m}$ より多少小さい値までの検出感度をもっている。ほとんどの物質、材料の熱膨張 ($5 \sim 80 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) はこの押し棒式熱膨張計で測定できる。

2. 光干渉計式高感度熱膨張計

しかし石英 ($0.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) や室温域で熱膨張が無いように製作された低膨張ガラス ($0.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) のように極めて熱膨張係数の小さい材料は通常の試料長を用いるかぎり、押し棒式熱膨張計では測定できない。

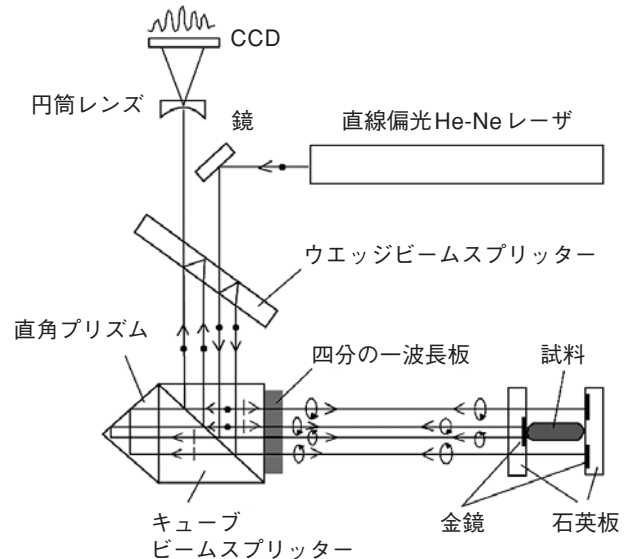


図1 LIX2 光学系平面図

アルバック理工はマイケルソン光干渉計方式の熱膨張計 (LIX2型) を製作している。これは図1の如く、一本のレーザー光束をウェッジビームスプリッターで二光束に振幅分割後、それらを試料を保持する二枚の石英板の鏡によって、それぞれ二回ずつ反射させ、二光束がビームスプリッターに戻るときには光路長差が試料長の四倍になるようにしている。これらの干渉による干渉縞は試料の加熱による膨張、収縮に伴い移動するので、縞の移動量を検出して試料の膨張、収縮量を測定する。試料に ΔL の熱膨張が生じたとき、光路長差の変化が $4\Delta L$ となること、およびレーザーの単色性により、非常に高感度である。NISTの石英 (径 5 mm × 長さ 12 mm) を室温から 700 °C までの範囲で $\pm 5\%$ の正確度で測定できる。

3. 新しい光干渉計式高感度熱膨張計 nano-LIX

今回、LIX2よりも更に高感度なマイケルソン光干渉計方式の熱膨張計 nano-LIX を製作したので概要を説明する。本熱膨張計は半導体集積回路の一層の微細化を実現する EUV リソグラフィ技術用の新しい低熱膨張ガラ

* アルバック理工 (株) 開発室

ス等の測定を想定している。

基本的にLIX2と検出センサ、データ採取部などは同じであるが、

- 1) 新たな光学部品を用いることにより、二光束の光路長差を試料長の八倍にした。同じ試料長で比較すると、LIX2の二倍の光路長差になる。
- 2) 試料の長さを20~25 mmとし、LIX2の試料長12 mmの約二倍にした。従って同じ温度変化に対する試料長の変化はLIX2の二倍になる。

以上により、膨張量の感度をLIX2の四倍にした。さらに、

- 3) 光学系を恒温箱内に収納し、室温ドリフトによる光路の変動を低減した。
- 4) 光源のHe-Neレーザがドップラー幅内で波長ドリフトを生じるのを低減させるため、レーザヘッドケースを恒温水で定温保持した。

などを行ない、原理的に高感度にしたことの効果を充分発揮できるようにした。

図2に新装置の光学系の平面図を示す。直線偏光のHe-Neレーザ(a)の光束をビームスプリッター(b)で反射させ二光束に分割し、偏光ビームスプリッター4個、直角プリズム1個、四分の一波長板1枚等からなる反射部品(c)に入射させる。この反射部品の下に試料があり、二光束のそれぞれを図3の如く、試料を置く基準板と試料端面の金鏡により四回反射させる。従来は二次元的反射光路のみを用いていたが、新装置では三次元的な光路展開により反射回数を増やした。従って、反射部品(c)から射出する二光束の光路長差は試料長の八倍にな

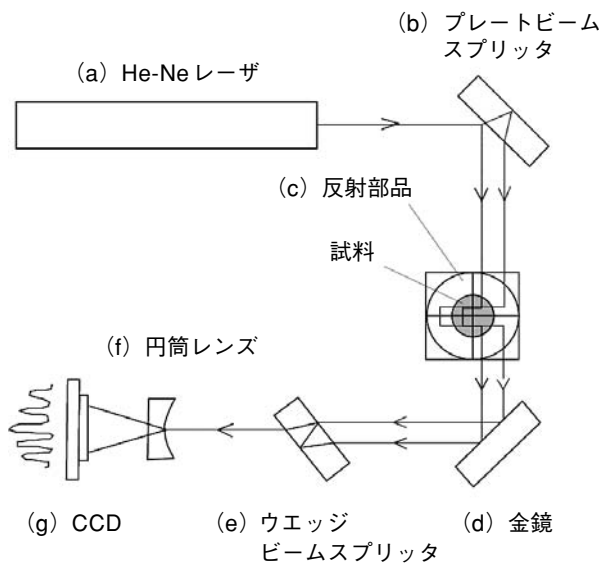


図2 新装置の光学系平面図

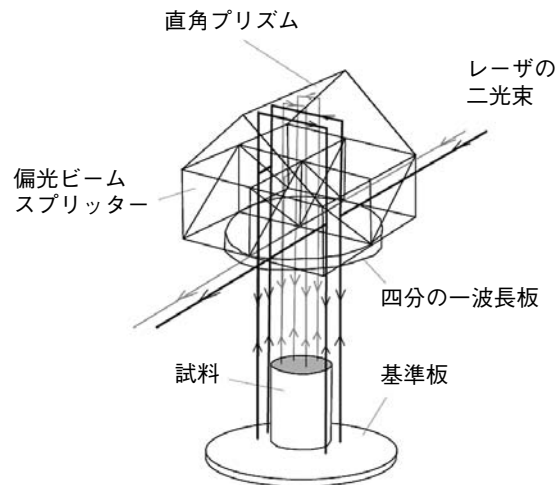


図3 二光束の反射光路

り、この二光束をウェッジビームスプリッター(e)で互いに鋭角で交叉させると縦の干渉縞が形成され、この移動量を測定すると試料の熱膨張を従来より高感度に検出できる。

光学系はヘリウムガス置換した気密性恒温箱に収納している。箱の全ての壁板内には恒温水を循環させている。ヘリウムガスは極めて熱伝導率が大きく、光学部品類の温度を壁面温度に等しい、一定温度に揃えることができる。さらに屈折率が1.000035と真空の値に近いので、仮に温度変動があっても光路長や向きの変化を小さく押さえることができる。

試料はこの恒温箱の底面板から懸垂した真空容器内にセットする。容器底部中央に主ヒータがあり、その上の基準板上に試料を立てる。試料寸法は径8 mm、長さ20

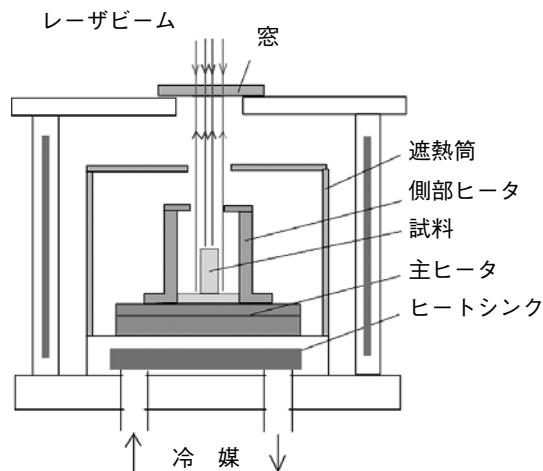


図4 試料容器側面概念図

～25 mmである。一端面を金コートして基準板の金鏡と共にレーザー光を四回反射させる。主ヒータの下には恒温水が循環するヒートシンクを備えており、試料をマイナス温度にするのはこのヒートシンクの恒温水の温度調節による。

試料の周囲には円筒状側部ヒータを設けて、試料の縦方向の温度分布の均一化を図っている。また真空容器側壁内にも恒温水を循環させて試料の加熱温度に拘わらず、容器の高さ方向の長さが変化しないようにしている。

4. 測定結果

図5に従来の代表的低膨張ガラスのULEとZerodurの測定データ、表1, 2に回帰線を用いて算出した熱膨張係数を示す。

測定条件

試料寸法：径8 mm×長20 mm

両端面平行度5秒，平面性10/λ

雰囲気：真空1 Pa台

昇温過程にて測定 0.1℃ min⁻¹

測温：Kタイプシース熱電対 近傍温度

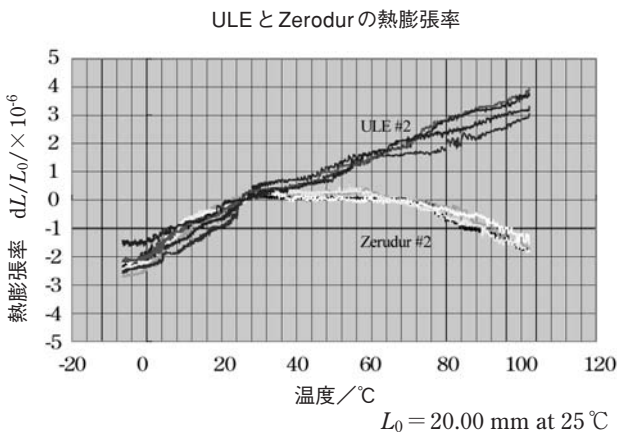


図5 ULEとZerodurの熱膨張率

表1 回帰式から算出したULEの係数

ULE#2 平均熱膨張係数/×10 ⁻⁹ K ⁻¹				
データ番号	0-25℃	25-50℃	50-100℃	0-100℃
(1) 7010	80.03	53.35	37.16	51.93
(2) 8010	77.49	52.02	38.27	51.52
(3) 3110	56.23	38.11	53.76	50.46
(4) 4110	76.33	37.73	54.96	55.99
平均値	72.52	45.31	46.04	52.48
(標準偏差)	(9.50)	(7.39)	(8.34)	(2.10)
カタログ値, メーカー	0 ± 30 × 10 ⁻⁹ K ⁻¹ (0-100℃間) コーニング社			

表2 回帰式から算出したZerodurの係数

Zerodur class2 #2 平均熱膨張係数/×10 ⁻⁹ K ⁻¹				
データ番号	0-25℃	25-50℃	50-100℃	0-50℃
(1) 4210	74.24	6.810	-34.29	40.52
(2) 5210	96.44	4.805	-35.58	50.62
(3) 7210	74.33	2.812	-25.82	38.57
(4) 8210	84.90	8.723	-38.41	46.81
平均値	82.48	5.788	-33.53	44.13
(標準偏差)	(9.15)	(2.207)	(4.69)	(4.83)
カタログ値, メーカー	0 ± 0.1 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹ (0-50℃間) ショット社			

25℃の温度幅の係数はULEがばらつき幅24 × 10⁻⁹K⁻¹で、0-100℃間の値はカタログ値の約二倍となった。一方Zerodurはばらつき幅22 × 10⁻⁹K⁻¹で、0-100℃間の値はカタログ値を満足した。

参考文献

- 1) S. J. Bennett : *Opt. Commun.* 4 (1972) 428.
- 2) S. J. Bennett : *J. Phys., E*, 10 (1977) 525.
- 3) R. Kato, T. Azumi and A. Maesono ; *High Temp.-High Press.*, 23 (1991) 615.
- 4) ASTM Designation E289-99 (1999)
- 5) 吉原邦夫：物理光学，共立出版 (1966) 1.