レーザー技術ノート

レーザーエネルギー計測における水晶圧電素子の特性

谷 山 哲 哉*・白 倉 康 弘*
鈴 木 薫*・升 谷 孝 也*

(1986年7月29日 受理)

Characteristics of Piezoelectric Crystal Element on
Laser Energy MeasurementTetsuya TANIYAMA*, Yasuhiro SHIRAKURA*,
Kaoru SUZUKI* and Takaya MASUTANI*

(Received July 29, 1985)

1. まえがき

レーザーエネルギー計測素子としての水晶圧電素子はパルスレーザー光を照射して熱応力を与えたときに発生する圧電分極の時間的変化を、出力電圧として電極間に取り出すものである。出力電圧の積分値はレーザー光のエネルギーに比例するので、著者等はこの素子をエネルギー計測に使用することを目的として基礎的な研究を重ねてきた。

この素子は $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ の波長領域に於いて入射光の90%以上を透過し、極めて少ない吸収エネルギーで出力電圧を発生するので、透過したレーザー光で仕事をしながら同時にエネルギーのモニターも行えると言う長所を持っている。がしかし、CWレーザーに対しては照射開始時だけ出力電圧を発生する。即ち、温度の時間変化を必要とするため、この素子の適用がパルスレーザーに限定されるという短所も持っている。

さらに、ここでは触れないけれどもこの素子は単にエネルギー計測用素子としてだけではなく、表面にミラー処理を施すと、エネルギーモニター機能を内蔵するパルスレーザー用の出力ミラーとして使用することも考えられる。

この素子の特性については既に報告しているが^{1,2)}、このとき残された問題点をさらに追求することにした。そこで水晶圧電素子を設計する立場から、(1)電極の穴の直径と出力電圧の積分値との関係、(2)レーザー光の集光径と出力電圧の積分値との関係、(3)水晶の厚さと出力電圧の積分値との関係、について実験を行った。ここに実験結果とその考察について報告する。

2. 実験装置

Fig. 1 は実験装置の概略図である。水晶圧電素子は寸法 $15 \times 15 \text{mm}$ のA TカットとXカット水晶板の両面にレーザー光を照射するための穴を開けて銀電極を厚さ $5 \mu\text{m}$ で蒸着したものであ

* 日本大学理工学部電気教室 (〒101 東京都千代田区神田駿河台1-8)

* Department of Electrical College of Science and Technology, Nihon University (8-1 Surugadai, Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo 101)

Fig.1 Shape of quartz specimen and model of heat source.

る。水晶板は厚さ1mm以下のものを使用した。YAGレーザー装置は東芝LAY-603型である。波長 $1.06\mu\text{m}$ 、パルス幅0.2から9msまで、エネルギーは0.2から25Jまでで実験を行った。レーザービームの直径は $5.0\text{mm}\phi$ 、これを焦点距離30mmの石英レンズで集光し、水晶圧電素子の電極に設けた穴の中心の水晶表面に垂直に照射した。この垂直度はHe-Neレーザー光をYAGレーザー光の光軸に合わせて照射し、入射光と反射光とが同一軸上になるように調節した。この操作により垂直度は1度以下に設定することが出来た。文中に断らない限り、電極の穴の直径は $0.2\text{mm}\phi$ 、水晶圧電素子の表面に焦点を合わせ、集光径 $0.2\text{mm}\phi$ で垂直に照射している。ここではATとXカットの水晶圧電素子を使用して、出力電圧波形とレーザー光の波形を同時に観測した。Fig.2は観測波形の一例である。尚、水晶圧電素子と測定系を含めた電気回路の時定数は $CR=3\times 10^{-4}\text{s}$ とした。レーザーの出力エネルギー

Fig.2 Photograph of laser light intensity and output voltage of quartz. (1.0mm thickness X-cut)

ギーはカントロクス製504型カロリメータで校正した。光パルス1発の測定精度は $\pm 2\%$ である。

3. 実験結果と考察

3.1 電極の穴の直径

厚さ1mmのATカット水晶にパルス幅1ms、エネルギー1Jを集光径 $0.1\text{mm}\phi$ で穴の中心を照射して、電極に開けた穴の直径 r と出力電圧の積分値 Q との関係を測定した。Fig.3に測定結果を示す。 Q を対数で目盛ると特性曲線を直線化することができ、 $Q=Q_0\exp(-\delta r)$ の関数形で表現することが出来た。 Q_0 は穴の直径が極めて小さく、発生した電荷の100%を電極に集めた時の Q と考えて約3.5、 δ は約0.023を得た。Fig.4は同様の測定を厚さ1mmのXカット水晶で行った結果である。 Q_0 は約34、 δ は約0.018となった。これらの結果から、水晶の切り出し角を変えると Q_0 が変化し、 δ は大きく変わらないことが分かった。

Fig. 3 Relation between diameter r of hole on electrodes and integrated value Q of output voltage. (1.0mm thickness AT-cut)

Fig. 4 Relation between diameter r of hole on electrodes and integrated value Q of output voltage. (1.0mm thickness X-cut)

次に電荷収集機構について考察する。出力電圧はレーザー光の照射と同時に現れて遅れ時間は極めて短く、穴の直径を変えても変化が見られない。また出力電圧の波形にも大きな変化が

見られない。レーザー光の照射位置から水晶の内部を熱が伝導し、電極の穴の周辺に到達した熱による Q を検出するものであれば、直径が $1\text{mm}\phi$ では遅れ時間は数 ms を要し、穴の直径が広がるとともに長くなるはずであるから、このような機構によるものではない。照射位置と電極とが静電容量で結合されていて、発生した電荷はこの結合を通じて収集されるのではないかとと思われる。何はともあれ穴の直径は出来る限り、レーザー光の集光径に近くするほうが良い。

3.2 集光径

Fig. 5 に集光径と Q との関係を示した。集光径は焦点の位置を変えることにより変化させた。横軸の十側は焦点を入射面から水晶の外に、一側は内に向かって移動させたことを意味しており、集光径の値は入射面上のものである。集光径 $r_0=0.1\text{mm}\phi$ は焦点が入射面上に、 -0.3 は出射面上にある。尚、電極の穴の直径は $3\text{mm}\phi$ とした。

また、集光径を大きくしたときにも、一側と十側とを比較すると一側のほうが大きな Q を示

Fig. 5 Relation between diameter r_0 focused laser beam and integrated value Q of output voltage. (1.0mm thickness X-cut)

す。

Fig. 5 では集光径 r_0 が $0.1 \sim \pm 1.7 \text{ mm}\phi$ まで r_0 を大きくするとともに Q はほぼ直線的に増大する。 $r_0 = 0.1$ に於ける Q を $Q_{\min}$ として両者の関係は $Q = Q_{\min} [1 + \varepsilon (r_0 - 0.1)]$ の関数形で示せることが分かった。一側 (焦点を水晶のレーザー光入射面からレーザー装置側に移動) に於ける ε は約 $14 \mu \text{ VS/mm}$, 二側 (焦点を水晶のレーザー光入射面から水晶圧電素子の内部に向かって移動) の ε は $11 \mu \text{ VS/mm}$ であった。入射面上の集光径を同じにしても一側が大きな値を示した。 $0.1 \text{ mm}\phi$ では 20% , $1.7 \text{ mm}\phi$ では 8% 程度大である。このような違いを生ずる原因は明らかではないが, 集光径を大きくすると差が小さくなることから加熱される水晶の体積が異なる為と推察している。また, 集光径が -1.7 以上で Q が低下するのは集光径を広げ過ぎて, エネルギー 1 J では温度上昇が困難になる為と思われる。測定では焦点を入射面より水晶圧電素子側に置いて集光径を $-1.7 \text{ mm}\phi$ にすると大きな Q を得ることができた。

3.3 水晶圧電素子の厚さ

水晶の厚さは出力電圧の値に大きく影響する。

Fig. 6 Relation between thickness of quartz $2a$ and integrated value Q of output voltage. (AT-cut)

Fig. 6 は電極の穴の直径を $0.2 \text{ mm}\phi$, 集光径を $0.1 \text{ mm}\phi$ として AT カット水晶の厚さと Q との関係測定した結果である。それぞれのエネルギーに於いて, 水晶の厚さを $0.3 \sim 1.0 \text{ mm}$ まで変えると 0.3 mm に於ける Q を 100% として 20% に迄減少している。

次に示す(1)と(2)式は水晶圧電素子が均一に加熱された場合に水晶の表面からの熱放散等による熱エネルギーの損失を無視して求めた温度の時間的变化から得られたもので, 著者等が先に報告している¹⁾。水晶圧電素子の厚さを変えてそれぞれの出力電圧波形を観測し, (1)式の計算値がこの波形と合致するように熱時定数 τ を決める。

$$V(t) = K \frac{1}{\tau - CR} [\exp(-t/\tau) - \exp(-t/CR)] \quad (1)$$

さらにこの τ を使用して(2)式¹⁾ から Q を算出した。

$$Q = K + \frac{K}{\tau - CR} [CR \exp(-t_0/\tau) - \tau \exp(-t_0/CR)] \quad (2)$$

但し, $K = \alpha \beta E / c \rho S (2a) t_0$, α と β : 水晶の吸収率と反射率, E : レーザー光のエネルギー, c と ρ : 水晶の比熱と密度, S : レーザー光の集光面積を $2a$: 水晶圧電素子の厚さ, τ : 水晶の熱時定数, CR : 測定回路の時定数, t_0 : レーザー光のパルス幅である。Fig. 6 の図中に白ぬきで示した $\circ, \triangle, \square$ はこの式による計算値である。ここではまず, 水晶の厚さが 0.2 mm のときの Q の測定値を用いて K を求めた。 K の値は 6 J で 2.0×10^{-5} , 8 J で 3.0×10^{-5} , 10 J では 3.5×10^{-5} となり, レーザーのエネルギーを大きくすると若干増加する傾向が見られた。この K の値を使用してそれぞれの厚さに於ける Q を算出した。水晶圧電素子の厚さに対する Q の変化の傾向に測定と計算との良い一致が見られた。

水晶圧電素子の厚さは $0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0 \text{ mm}$ の 5 種類で, τ はそれぞれ $6.3, 10.2, 19.8, 25.5, 38.7, 53.5 \text{ ms}$ を得た。先の報告¹⁾ では $\tau = c \rho a^2 / k$ として考えたが, 出力電

圧波形から得た τ は水晶圧電素子の厚さの2乗に比例していない。但し、 c は水晶の比熱、 ρ は密度、 k は熱伝導率である。ここで水晶の表面からの熱放散を考慮すると、 $\tau = c\rho a^2/k y_1^2$ (y_1 は $y \tan y = a\eta/k$ の一番目の根、 η は熱放散係数) となり³⁾、出力電圧波形から求めた τ はこの関係式をほぼ満足する。以上の結果から、レーザー光で局部を加熱したが、計算では均一加熱で、水晶の表面から熱放散があると考えて取り扱うことができる。

さらに(2)式をパルス幅 t_0 について計算すると、 Q と t_0 とが比例関係を示す領域がある。この領域では(2)式はパルス幅の依存性を示さない。実験では、厚さ0.2mmのATカットではパルス幅1ms以下¹⁾、1.0mmでは5ms以下¹⁾、厚さ1mmのXカット ($\tau = 1.5 \times 10^{-4}$ s, $\eta = 0.53$ J/cm² · s · deg) では0.4ms以下¹⁾に於いてパルス幅の依存性を持たないと言う結果が得られている。(2)式から推定される Q がパルス幅の依存性を示さない t_0 の最大値はXカットではほぼ一致した。厚さ0.2mmのATカットでは計算によるとパルス幅は4msになるが、実際に Q がパルス幅に依存しないのは1msまでであった。また、厚さ1mmでは18msまでのはずが実際には5msまでであった。即ち、 τ が 10^{-4} オーダー以下では実際と良く一致するが、 10^{-4} オーダー以上では計算から求まるパルス幅の最大値の1/4以下で Q がパルス幅の依存性を持たないとして設計するべきである。

4. まとめ

ここに実験結果を略述する。

1) 水晶圧電素子の厚さと Q の関係はほぼ次式

$$Q = K + \frac{K}{\tau - CR} [CR \exp(-t_0/\tau) - \tau \exp(-t_0/CR)]$$

の関数形で示される。

2) 電極の穴の直径と Q との関係は次式で示される。

$$Q = Q_0 \exp(-\delta r)$$

穴の直径はレーザー光の集光径に出来る限り近い値にすることが望ましい。

3) 集光径 r_0 が0.1~±1.7mm ϕ の範囲では、レーザー光の集光径と Q との間に次の関係がある。

$$Q = Q_{\min} [1 + \varepsilon (r_0 - 0.1)]$$

レーザー光の集光径には最適値があつて、厚さ1mmの水晶に1Jを与えよときの集光径は-1.7mmが最適であつた。

以上の3つの結果と既に報告した結果¹⁾を合わせて水晶圧電素子を設計する際の基礎データを作ることが出来たと考えている。

最後に、この研究に協力して下さいた大学院生と卒業研究生の諸君に深く感謝致します。また、著者等にYAGレーザーを与えて下さった日本大学前理工学部 加藤渉先生に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 谷山・鈴木・武中・中田・升谷：レーザー研究，5 (1984) 248.
- 2) 白倉・鈴木・谷山・中田・升谷：電気学会全国大会予稿集，昭和59年No. 157.
- 3) 電気学会：放電ハンドブック (1957) 304，オーム社
H. S. Carslaw and J. C. Jaeger: Conduction of Heat in Solid 2nd Edition Oxford (1959) 130.