レーザー技術ノート

自己較正型X線ボロメーターを用いた
軟X線プレートの絶対感度較正

砂原 淳*・西村 博明*・米田 仁紀**・中井 貞雄*

(1995年3月6日 受理)

Absolute Calibration of Soft X-ray Plates
by Using A Self-Calibrated X-ray Bolometer

Atsushi SUNAHARA*, Hiroaki NISHIMURA*, Hitoki YONEDA**, Sadao NAKAI*

(Received March 6, 1995)

The sensitivity of soft X-ray plates, Kodak 101-05 and ILFORD Q-PLATE at 1.1 keV was measured by using a self-calibrated X-ray bolometer as a standard detector for absolute measurements of soft X-rays. Cross-calibration was also made by using an X-ray sensitive diamond detector. Good agreement in the absolute sensitivity was obtained between the bolometer and the diamond detector.

Key Words: Absolute soft X-ray measurement, Kodak 101-05 plate, ILFORD Q-plate, γ -curve, X-ray, Bolometer, Diamond detector

1. はじめに

レーザー生成プラズマより発生する高輝度X線はX線リソグラフィ¹⁾, X線レーザー²⁾, X線マイクロコピー³⁾, 間接照射型爆縮核融合⁴⁾等, 様々な分野で幅広く応用されている。従来これらのX線の検出にはX線フィルム⁵⁾, X線真空ダイオード⁶⁾, 高速半導体検出器⁷⁾, 蛍光体/マイクロチャンネルプレート⁸⁾等が用いられてきたが, これらの検出器を用いて発光スペクトルを正確に測定し, 絶対光量を押さえるためには, 検出器の分光感度や絶対感度, 飽和特性を知る必要がある。

検出器の絶対感度を較正するためには適当なX線源と感度の既知な基準検出器が必要である。例えばX線フィルムに対しては較正用X線源として軟X線管が, 基準検出器として比例計数管が一般的に用いられて来た⁹⁾。しかし測定対象のX線強度がX線管から放出されるX線と極端に異なる場合は相反則不規¹⁰⁾の問題が生じ, 較正源の時間幅スケールと観測対象とする現象の時間スケールをそろえた感度較正法を用いなければならない。このためレーザープラズマX線を観測対象とする限りにおいて, 連続発生型のX線管や高繰り返しパルスによる準連続発生型のシンクロトロン放射光に代わって, 単

*大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565吹田市山田丘2-6)

**電気通信大学レーザー極限技術研究センター (〒182東京都調布市調布ヶ丘1-5-1)

* Institute of Laser Engineering Osaka University (Yamadaoka 2-6, Suita, Osaka 565)

** Institute for Laser Science, University of Electro-Communications, (1-5-1, Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182)

一パルス状のレーザープラズマX線源で較正する必要が生じた。一方、基準検出器として蛍光体/マイクロチャンネルプレートやX線真空ダイオードを考えた時、X線吸収端の存在により分光感度は複雑な構造を持ち、また表面酸化などに伴う長期的な安定性に問題があるため基準検出器としては不向きである。またシリコン半導体検出器では軟X線の吸収長が $\sim 1000 \text{ \AA}$ 程度と短いために表面準位や格子欠陥、表面の汚れ等によって分光感度が左右され、その構造も複雑になるなどの問題があり、やはり絶対感度を与える基準検出器としては問題が多い。このような背景から分光感度が平坦で、経時変化もなく、しかも外部較正源を用いずに自己絶対感度較正を行うことができる基準検出器が求められていた。そこで今回、自己較正の可能なボロメーター¹¹⁾を製作し、X線プレート(Kodak社101-05plate, ILFORD社Q-plate)の絶対感度較正を行った。併せて測定法の妥当性を確認する目的で光導電性素子であるダイヤモンド検出器^{12,13)}を較正実験時に併用し、応答並びに感度の相互比較を行った。その結果、X線入力に対するボロメーター及びダイヤモンド検出器の出力は線形性、絶対感度ともに良い一致が得られた。

2. 軟X線絶対計測用ボロメーター

ボロメーターとはX線などの輻射や粒子束を吸収体に吸収させ、この温度上昇を何らかの方法で検出して吸収エネルギーを測定する検出器である。吸収体や吸収体の温度上昇を検出する測温法には、測定する輻射や粒子のエネルギー域や用途に応じて種々のものが存在する。今回対象とするのは軟X線領域であるので軟X線に対してフラットな分光特性となるように吸収体にはAuを用いた。測温法としては測温抵抗体や熱電対、ピエゾ素子を用いる等の方法があるが、感度の自己較正を行う観点から今回は測温抵抗体を採用した。この測温抵抗体に対しても温度係数の高さや経年的安定性、製作技術上の観点からAuを材料として用いた。一般にレー

ザーショットにより発生するX線による温度上昇はきわめて小さいため($\sim 0.001 \text{ }^\circ\text{K}$)、測温抵抗体の温度上昇信号を記録可能なレベルまで増幅する必要があり、この過程で混入するノイズをいかに抑制するかがボロメーター検出器の性能を決める重要なポイントとなる。このノイズの成分として測温抵抗体のバイアス電流による温度上昇に起因した熱雑音や、増幅部から生じる固有のノイズ及びレーザープラズマを生成したときに生ずる外部ノイズなどがあり、それぞれに対して低減対策が必要である。増幅部に関しては一段目にチョッパーアンプを採用し、さらに外来のノイズの混入を防ぐためにローパス、ハイパスのフィルターを挿入することによりボロメーターの応答時定数にほぼ一致する5 $\sim$ 10 Hz付近で増幅利得が最大となるような周波数特性に設定した。この他、増幅部の電源や測温抵抗体のバイアス電源にもノイズフィルターを組み込み、ノイズの混入を極力抑えた回路構成となっている。

ボロメーターの自己感度較正は測温抵抗体にパルス状の電流を流し、吸収体の温度上昇を引き起こすことにより行った。この方法は吸収体と測温抵抗体の温度平衡がこれらの冷却時間スケールに比べて速やかにとれる限りにおいて妥当であり、各種のカロリメーター較正に採用されている方法である。吸収体と測温抵抗体との熱平衡のモデル解析に関しては詳しい研究がなされており¹⁴⁾検出部の設計にはこれらの結果を参考にした。

2.1 試作した装置の構成

Fig. 1に試作したボロメーターの構成を示す。装置は吸収体と測温抵抗体からなる検出部、測温抵抗体の抵抗値の変化を電圧の変化に変換するブリッジ部、微小な電位変動をオシロスコープで測定できるレベルまで上昇させる増幅部、ショット時のプラズマ粒子やターゲット蒸気による吸収体の冷却を防止する真空排気系からなる。Fig. 2に本装置の写真を示す。検出部に直結された増幅回路基板と真空排気装置が見え

Fig. 1 Bolometer circuit is composed of 4 parts. Output voltage from the Wheatstone bridge is amplified by a low frequency amplifier which is composed of non-inverted op-amp. circuit. Four high speed relay-switches for absolute calibration of the sensor synchronously operate. The resistors RE and RE' are current controllers for self calibration.

Fig. 2 Bolometer

る。ボロメーターの検出部はX線フィルターを介してプラズマ生成チェンバーとは隔離された小型の真空容器の中に納められている。

<検出部>

Fig. 3に検出部の構造を示す。ポリイミド系プラスチックフィルムKAPTON

$(N-(CO)_2-C_6H_2-(CO)_2-C_6H_4-O-C_6H_4)_n$ ($7 \mu m^t$)

を基板としてX線入射側にAuの吸収体($1 mm \times 3 mm \times 4 \mu m^t$)が、裏面に測温抵抗体(断面積

$1.5 \mu m^2 \times 0.129 m$)が吸収体の占める範囲に収まるようジグザグ構造で4チャンネル分配置されている。各チャンネル間はアルミニウム製のヒートシンクを兼ねた支持構造体でサンドイッチされ、チャンネル間の熱的な結合を押さえている。吸収体Auの0.1~2 keVに対するX線吸収特性はほぼ100%で、これらの輻射に対して平坦な分光感度特性が得られる。X線吸収による測温抵抗体の熱的な応答特性は吸収体と測温抵抗体との熱緩和時間によって決まり、計算から $\sim 500 \mu s$ 程度となった。立ち下がり特性については熱伝導による冷却時間によって決まる。検出部の温度上昇は7ergの入力で $\sim 0.01 K$ 程度であるから熱放射による冷却は無視でき、ほとんどの熱は伝導により散逸する。即ち、吸収体とKAPTONとの間の $0.1 \mu m$ のAuコート層を伝ってアルミニウム製の支持構造体に伝熱することにより熱緩和する。このとき冷却時間は $\sim 200 ms$ と見積もられた。

<ブリッジ及び増幅部>

ブリッジ部はホイートストンブリッジ回路と自己較正用回路(較正用低抵抗と高速リレー)から成る。通常は較正用抵抗 RE , RE' は回路に

Fig. 3 Cross-sectional view of the bolometer sensor. X-ray absorber and thermo-resistor for temperature measurements are evaporated on polymer film (KAPTON). Thermal coupling between neighboring channels is prevented by contacting an aluminum heat sink with the gold heat conduction layer.

直列に接続されており、高周波バイパスコンデンサーが付加されている。吸収体の温度上昇による測温抵抗体の抵抗上昇値を ΔR 、ブリッジ駆動電圧を U_0 、抵抗値を図中の値としてブリッジ出力 V_0 は(1)式ようになる。ここで第1項は測温抵抗体の温度上昇による抵抗値の増加の結果生じる出力電圧で、第2項は較正用抵抗 RE と RE' の電圧降下に差がある場合の出力電圧に相当するもので、ブリッジ出力のグランド電位がノイズフィルター用のコンデンサーを介して影響を受け、 $U_0/2(V)$ からずれる結果生じる出力電圧である。

$$V_0 = \frac{\Delta R}{4R} U_0 + \frac{5}{2} \frac{RE' - RE}{R} U_0 (V) \quad (1)$$

標準的な値として吸収体に5.0 ergのエネルギーをボロメーターの応答時間よりも十分短い時間に与えると測温抵抗体の温度上昇は $7.0 \times 10^{-3} K$ となり、このときのブリッジ出力は $28 \mu V$ と見積もれた。この出力を通常のオシロスコープで観測するため、応答周波数10 Hz付近で最大値を持った狭帯域アンプのピーク増幅率を標準値5万倍と設定した。

2.2 ボロメーター単体による絶対感度較正

ボロメーターの自己較正は次のように行っ

た。Fig. 1において外部パルス電源により較正用各リレーは同時動作し、較正用抵抗の両端を短絡する。この動作によりブリッジ回路を流れる電流はパルスの増加し、ブリッジの各抵抗でのジュール熱消費はわずかに増加する。熱容量の差からブリッジ回路の金属被膜抵抗での温度上昇は測温抵抗体に比べて無視できるので、測温抵抗体のみを温度上昇させることができる。リレー動作時に各測温抵抗体に与えられるエネルギー $E(\text{erg})$ は測温抵抗体における消費電力の変化とリレー動作時間幅 $\tau(s)$ の積として、(2)式のように計算できる。(自己較正時には4 chのうち1 ch分をブリッジ平衡確認用に使用するため、ここでは3 ch分の等価な測温抵抗体がブリッジ回路に並列接続されているとして計算した。)

$$E = 2 \cdot RE \cdot \frac{U_0^2}{R^2} \cdot \tau \times 10^7 (\text{erg}) \quad (2)$$

(ただし、 $RE = RE' \ll R_b = R$ とした)

熱緩和時間を考慮して較正用リレーは動作時間幅 τ を16 msとした。空気による熱伝導損を避けるためにボロメーターの検出部は真空容器に取り付け、圧力 $2 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ のもとで自己較正

(a)

(b)

Fig. 4 (a) Equilibrium of Wheatstone bridge was confirmed. (b) Result of the self-calibration. A good linear response is obtained.

を行った。投入エネルギーは自己較正用抵抗値を変えることにより変化させた。(1)式から明らかのように自己較正時にはブリッジの平衡が成り立っていないければ出力に誤差を生じる。また較正用抵抗 RE と RE' についても等しい値でなければ出力に誤差を生じる。このため回路中の抵抗値調整は注意深く行った。この調整を確認するために1 ch分の測温抵抗体を金属被膜抵抗に取り替え、出力を観測した。この結果をFig. 4(a)に示す。増幅器の位相特性の関係から得られた信号は一旦、正值を示した後、負になり、やがて一定値となる。自己較正としてはこの正信号のピーク値を用いた。信号の立ち上が

りも増幅器の特性を反映して50 msとなっている一方で信号の減衰時間は約250 msで、モデル計算にほぼ一致する。またダミー抵抗を挿入した場合にも僅かに出力があるものの本信号の約15分の1以下に押さえられている。較正用投入エネルギーをさらに大きくすることで相対的にこの誤差原因は抑えられ、較正誤差は最終的に5%となった。較正用抵抗の値を変化させ、投入エネルギーに対する出力の結果をFig. 4(b)に示す。良好な線形特性が得られている。ここで増幅回路の最大増幅率(5万倍)をもとに得たボロメーター自体の感度は $6.6 \mu\text{V/erg}$ であった。

3. ボロメーターを使用したフィルムの絶対感度較正

3.1 実験条件

今回絶対感度曲線を測定したのはILFORD社Q-plateとKodak社101-05plateである。従来軟X線用フィルムとして広く使われてきたKodak社製101-01(または101-07)フィルムは1991年7月をもって製造中止となったが、これに代わって現在101-05plateが入手可能である。またQ-plateは粒子検出用として核計測の分野で広く用いられて来たものである。両プレート共にガラス板の上に感光乳剤が塗布されており、従来のフィルムに比べて取り扱いが比較的容易になっている。X線プレートの感度較正実験にはX線源としてレーザープラズマを用いた。用いたレーザーは大阪大学レーザー核融合研究センター激光MII号の1ビームで、波長351 nm, パルス幅500 ps, エネルギー0.2~25 J, 照射強度 $9.0 \times 10^{11} \sim 1.1 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ であった。レーザー入射角は 45° とし、この時のスポット径は $200 \times 280 \mu\text{m}$ のほぼ楕円形とした。ターゲットは厚さ $25 \mu\text{m}$ の平板Cuを用い、CuプラズマからのLバンド放射1.1 keV, エネルギー幅+0.1, -0.06 keVを使用した。1.1 keV以下の低エネルギーX線成分をカットするために $1 \mu\text{m}^t$ のアルミニウムフォイルをフィルターとして用いた。このフィルターはまたレーザー散乱光やプラズマ粒子がボロメーター上に飛来す

るのを抑え、真空隔離する役目も持つ。ポロメーターの自己較正を確認し、併せてX線プレート較正の信頼性を増す目的で、別個に絶対較正されたダイヤモンド検出器を併用した。この検出器の前にも同様のアルミニウム $1\mu\text{m}^2$ が置かれている。今回はダイヤモンド検出器の特徴である時間分解計測は生かさず、時間積分値であるエネルギー計測で比較したので、ポロメーターやX線プレートの感度を求める際はダイヤモンド検出器からの出力を時間積分し、出力電荷量に等価な量で比較した。以下の記述においてこの電荷量を表すのに使用した単位は負荷 50Ω における出力電圧と時間幅の積(nVs)とした。(1 nVsは 2×10^{-11} [C]に相当する。)プレートの露光量を幅広くとるため、レーザーエネルギーを変化させるだけでなくプラズマ光源とプレートの距離を $R=3628\text{ mm}$ と 1178 mm の2カ所とした。このとき較正基準となるポロメーターとダイヤモンド検出器の位置は固定したままであった。X線の角度分布はランバート分布(いわゆる $\cos\theta$ 分布。 θ はターゲット垂直からの角度)に従うと仮定した。プラズマの膨張に伴い、レーザーパルス幅500 ps間に生じるターゲット垂直方向の発光域広がり $50\mu\text{m}$ 程度と見積もられるのに対し、レーザースポットは $200\times 280\mu\text{m}$ であるのでほぼこの仮定は妥当と考えられる。なお、等方分布だと仮定した時との差から生じる誤差はプレートの較正で7%程度である。実験に用いたプレートの製造番号はQ-plateがBatch 62D-PQA-119, 101-05plateがCAT.193 6293であった。露光面のサイズはプレート上で $3\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ で、像エッジ部の現像促進現象による見かけ上の黒化度上昇¹⁵⁾は抑えるようにした。露光されたプレートは両方ともTable Iに示す手順に従って現像を行った。露光したフィルムの光学濃度は1次元のマイクロデンシトメーター(サクラmodel PDM-5 microdensitometer N.A=0.10)で測定した。

3.2 測定結果

まずX線ポロメーターとダイヤモンド検出器

Table I Plate developing procedure.

pre-soaking	20 °C pure water 2 min.
developing	20 °C Kodak D-19 duoble diltion 4 min.
stop	20 °C pure water 30 sec.
fixation	20 °C Fuji sulper fix 3 min.
soaking	7 min.
drywell	Fuji drywell at room temperature 30 sec.
dry	at room temperature in still air

Fig. 5 Outputs from the bolometer and diamond detector versus the incident laser energy on the Cu source target. As for as conversion efficiency of the laser to x-rays is independent on laser irradiance, quantity on the horizontal axis is equivalent to incident x-ray energy on each sensor. This hypothesis can be confirmed by linear response of the bolometer.

の照射レーザーエネルギーに対する線形性を調べた。結果をFig. 5に示す。横軸は照射レーザーエネルギー、縦軸はポロメーターとダイヤモンド検出器の出力である。光源として用いている準単色X線へのレーザーからの変換効率がレーザー照射強度に対して変化せず一定の値を持つという前提においてこのプロットは妥当である。使用したレーザーの波長やパルス幅、照射強度を考慮するとレーザー吸収率は95%以上でほぼ一様と考えられる¹⁶⁾が、吸収エネルギーからX線への変換効率はまだ詳しく調べられていない。しかし測定結果から次のようなことが判る。ポロメーターの自己較正の結果からポロ

Fig. 6 Dependence of ILFORD Q-plate and Kodak 101-05 plate on x-ray exposure obtained by the x-ray bolometer. Photon energy is 1.1 keV of Cu L-lines. In the lower exposure case, output from the diamond detector was used because of better signal-to-noise ratio.

メーター出力は入射エネルギー量に比例して増加する領域内である事が判っているから、Fig. 5の関係から放出された準単色X線エネルギーはレーザーエネルギーに比例して増加しているものと考えられる。即ち本実験の条件下においてレーザーからX線への変換効率がほぼ一定であり、グラフの横軸をX線のエネルギー量に一定の比例係数で読み替えることが出来る。この推察よりダイヤモンド検出器はX線の入力エネルギーが小さい時には線形性が保たれているものの、入力エネルギーの大きな所では飽和傾向を示すことが判った。ダイヤモンド検出器をボロメーターにより絶対値較正して得られた感度は 2.59×10^{-4} A/Wとなった。ボロメーターにより較正したX線プレートの絶対感度曲線(γ曲線)を示す。ここでいう光学濃度はフォグレベルを差し引いた値である。各測定データ点を結ぶ曲線はHenke¹⁷⁾の薄エマルジョンモデルから最適パラメーターを決定したものである。Fig. 6から明らかなように101-05plateの方がQplateに比べ約4倍の感度を持ち、飽和点も高い値を示している。

3.3 ボロメーターによるダイヤモンドの絶対感度較正

ダイヤモンド光電素子は、シリコンなどの半導体検出器と比べて、1)動作原理上空乏層などの問題がない、2)低Z物質のため侵入長が長くとれ表面再結合等の影響が少ない、などの理由により低エネルギー領域から高エネルギー領域まで分光感度が一定となる特長を持っている。この検出器の出力電流密度 J はキャリアー密度 n 、移動度 μ 、電界強度 E の積となり、小キャリアー注入時にはキャリアー密度すなわち入射光量に比例したものとなる。

さて、入射光量の増大に伴いキャリアー密度が増加すると、キャリアー・キャリアー散乱による移動度の低下が検出器の感度を減少させる。この散乱過程による移動度はダイヤモンド内の電子、正孔の有効質量より計算され以下のようになる¹⁸⁾。

$$\mu_{\text{ccs}} = 3 \times 10^{16} \frac{T^{3/2}}{\sqrt{n_e n_p}} \times \frac{1}{\left[\ln \left(1 + 1.77 \times 10^8 \frac{T^2}{(n_e n_p)^{1/3}} \right) \right]} \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}} \right] \quad (3)$$

ここで n_e は電子の数密度、 n_p は正孔の数密度、 T は温度である。

実効的な移動度 μ_{eff} は小キャリアー時の μ_0 とこの μ_{ccs} の調和平均になる。本研究でダイヤモンド検出器が使用された条件ではキャリアー密度が 10^{17} cm^{-3} を越えるため、線形領域から飽和領域にかけて動作していることになる。

Fig. 7はボロメータにより測定されたX線量に対するダイヤモンド出力結果を表わしている。図中の点線は、キャリアー・キャリアー散乱を考慮したモデルにより、小キャリアー時の感度 S_0 、移動度 μ_0 をパラメータとしてフィッティングした結果である。このモデル中でキャリアー密度はボロメータで測定した入射X線光量から見積もってある。Table IIはその結果を

Fig. 7 Calibration of the diamond detector with bolometer at photon energy 1.13 keV.

Table II The sensitivity, mobility and carrier life time calculated with the results of the Bolometer.

	parameters estimated from the Bolometer	parameters from the previous laser experiments or reference value
sensitivity S_0	$3.87 \pm 0.56 \times 10^{-4}$ [A/W]	3.82×10^{-4} [A/W]
mobility μ_0	1297 ± 295 [cm^2/Vs]	1200 [cm^2/Vs]
carrier life time	164 ± 50 ps	238 ps

まとめたもので、以前に求めた $h\nu = 100 \sim 284$ eVにおける感度較正值¹³⁾や文献値⁷⁾とともに示している。これからわかるように、今回の値は以前に求められた移動度、感度とも非常に良い一致をしていることがわかる。また、感度については、今回の1.13 keVでのデータと以前の100~280 eVのデータがほぼ一致したことでダイヤモンドの特質である分光感度のフラット性も示されたことになる。また、表には感度 S_0 、移動度 μ_0 、平均電子・正孔対生成エネルギーから求められるキャリア寿命の計算値も合わせて示してある。この値は、やはり以前独立して行なわれた超短パルスレーザー励起による寿命測定値¹³⁾とほぼ一致しており、今回使用しているモデルの正当性を裏付けている。

4. まとめ

軟X線絶対計測用ボロメーターの開発を行い、X線プレートの絶対感度較正実験に適用した。そしてILFORD社Q-plate、Kodak社101-05plateについて光子エネルギー1.1 keVにおける絶対感度計測を行った。今回の実験ではボロメーターの特徴である絶対計測と自己較正機能により軟X線領域での絶対感度較正が比較的簡単に出来るようになった。さらにダイヤモンド検出器との併用によりボロメーターのS/N比が問題になるような小さな投入エネルギー時においても絶対値計測が行えた。ボロメーターの絶対感度較正の妥当性を確認するためボロメーターを基準として得たダイヤモンド検出器の絶対感度は、別個に測定された感度に良く一致した。

ボロメーターは今後、さらに低ノイズ化を図る事により単体でも十分に軟X線絶対計測器として利用できるほか、多チャンネル化を図り、回折格子との組み合わせにより分光計測にも対応できると期待されている。

謝辞

ボロメーターの製作にあたっては、大阪大学レーザー核融合研究センター計測研究室、杉本吉隆君、戸川金美君の協力を得ました。またX線プレートの較正実験には白神宏之助手はじめ、レーザーオペレーショングループの協力を得ました。深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えばG. D. Kubiak, et. al.,: J. Vac. Sci Technol. B9 (1991) 3184 とその参考文献.
- 2) R. C. Elton: X-ray Lasers (Academic Press, Boston, 1991).
- 3) R. H. Price: American Institute of Physics, Conference Proceedings 75 (1981) 189.
- 4) 西村博明: 核融合研究 63 (1990) 4.
- 5) 三浦永祐, 富江敏尚: レーザー研究 21 (1993).
- 6) R. H. Day, P. Lee, E. B. Saloman and D. J. Nagel: J. Appl. Phys. 52 (1981) 6965.
- 7) D. R. Kania, R. J. Bartlett, R.S. Wagner, R.

- B. Hammond and P. Pianetta, Appl. Phys. Lett., 44 (1984)1059; R. B. Hammond, R. S. Wagner and N. G. Paulter: InP: Fe picosecond photoconductors, proceedings of SPIE vol. 439 "Picosecond Optoelectronics" p192 (1983).
- 8) R. J. Fonck: Multichannel Extreme UV Spectroscopy of High Temperature Plasmas ACS Symp. Ser. 236 (1983) 277.
- 9) B. L. Henke, J. P. Knauer and Premaratne: J. Appl. Phys. 52(3) (1981).
- 10) H. Nishimura, K. Eidmann, K. Sugimoto, W. Schwanda, T. Toyoda, K. Taniguchi, Y. Kato and S. Nakai: J. X-ray Science and Technol. 3 (1991) 14.
- 11) K. Eidmann, T. Kishimoto, P. Herrmann, J. Mizui, R. Pakula, R. Sigel and S. Witkowski: Laser and Particle Beams, 4 (1986).
- 12) D. R. Kania, L. Pan, H. Kornblum, P. Bell, O. N. Landen and P. Pianetta: Rev. Sci. Instrum. 61 (1990) 2675.
- 13) 米田仁紀：ダイヤモンドを用いたレーザー生成プラズマの超高時間分解X線計測，平成4年度科学研究補助金(重点領域研究)「X線結像光学」研究成果報告書(研究代表者 山下広順) p369 (平成5年7月).
- 14) P. Betzler: Mehrfachbolometer fuer hohe Raumaufloesung, M. P. Q /Germany.
- 15) J. C. Dainty and P. Shaw: Image Science, p53 Academic Press, London/New York/San Francisco, 1974.
- 16) H. Nishimura, H. Takabe, K. Kondo, T. Endo, H. Shiraga, K. Sugimoto, T. Nishikawa, Y. Kato and S. Nakai: Phys. Rev. A43 (1991) 3073.
- 17) B. L. Henke, S. L. Kwok, et. al.,: J. Opt. Soc. Am. B1, 6 (1984) 818.
- 18) S. C. Choo: IEEE Trans. Electron Devices, ED-19 (8), 954-966 (1972).