

小特集

CCD 検出器を利用したプラズマ計測の最近の進展

3. 背面照射型 CCD 検出器を利用した 可視, 真空紫外, X 線分光計測

森 田 繁, 後 藤 基 志
(核融合科学研究所)

Visible, Vacuum Ultraviolet and X-Ray Spectroscopy
Using Back-Illuminated CCD Detector

MORITA Shigeru and GOTO Motoshi
National Institute for Fusion Science, Toki 509-5292, Japan
(Received 5 September 2000)

Abstract

Back-illuminated CCD detectors have been used for visible, VUV and x-ray spectroscopy. The results are compared with those generated by conventional detection systems such as the photodiode array with image intensifier or micro-channel plate. The use of the back-illuminated CCD demonstrated excellent qualities including low noise, a high level of spectral resolution and a greatly extended output dynamic range. Detailed results of the comparison are also discussed.

Keywords:

back-illuminated CCD detector, visible spectroscopy, VUV spectroscopy, x-ray spectroscopy

3.1 はじめに

背面照射型 CCD は通常型の CCD 検出器 (前面照射型 CCD) が登場したところから製品として製作されていたが, 暗電流が非常に大きく液体窒素で冷却する形式を採用していたためあまり普及しなかった. またホットピクセルと呼ばれるとくに暗電流の多い場所が残されていたりしたこともあって微弱光検出を主とするような科学計測用にはあまり適さなかった. このような理由でこれまで, CCD もしくは PDA (PhotoDiode Array) 検出器の前面に I.I. (Image Intensifier) や MCP (Micro-Channel Plate) 等の増幅器を設置して光計測を行っていた. しかしながらここ数年の間に CCD 素子の製作技術が格段に進歩した結果, 上記のような欠点も少なくなりペルチエ素子で電氣的に冷却する (通常マイナス 40℃ 程度) だけでほと

んど暗電流が抑えられるようになり, 一般使用者に対して非常に使いやすいものとなった. そこでプラズマ分光計測用に従来使用されてきた検出器と背面照射型 CCD 検出器とのデータの比較を可視, 真空紫外および X 線の各領域で行ったのでそれについて報告する. なお, ページ数が非常に制限されているので詳細な点はすべて割愛せざるを得なかった. わかりにくい点や疑問, コメント等ありましたら, 著者まで問い合わせていただければ幸いである.

3.2 背面照射型 CCD 検出器

通常よく使用されている CCD 検出器は電極側から光を入射する (前面照射型 CCD). その際に電子正孔対が生成され, その電荷を電極で集めることにより CCD の各ピ

author's e-mail: morita@nifs.ac.jp

クセルの電気信号とする。より高いエネルギーをもった光（X線）は有感部を通り越しバルクシリコン中で光電効果により吸収され、ほぼ入射X線と等価なエネルギーを持って放出された一次電子が多くの二次電子をその近傍で作る。したがってそこで創り出された電子が電極まで到達する割合は当然低くなる。通常有感部の厚さは10–20 μm 程度、バルクシリコンの厚さはおよそ500 μm 程度である。また、可視光は一部が電極の表面で反射されるのでその分だけ効率が劣化する。Fig. 1にその概略を示す。

一方、背面照射型 CCD とは CCD 素子の裏側から光を入射してそれによって生じた電荷を電極に集める方式の CCD をさす。背面照射型 CCD は前面照射型 CCD のバルクシリコン部分を削り取り半導体部分を有感部のみにしたものである。通常背面部表面には可視光の検出感度を上げる目的で反射防止膜（AR コート）がコーティングされている。検出効率は前面照射型 CCD の場合電極部分（電極材料はポリシリコンとされている）での可視光の反射等のため、通常40–50%程度にとどまっている。こ

れに対して背面照射型 CCD の検出効率はそれらの構造物が一切ないため可視領域で80%以上となる。背面照射型 CCD の場合高エネルギーのX線に対しては（有感部が10–20 μm だと5–10 keV 以上）透過率が大きくなるので感度が著しく低下する。

3.3 可視分光計測

通常分光器を用いた可視分光は荷電交換分光を除くとプラズマ中での H/D（水素／重水素）比の測定やダイバータ分光等で高温プラズマの計測に応用されることが多い。比較的溫度の低いプラズマでは CV (2270 Å, 2 278 Å) 等を利用してイオン溫度の計測も行われている。そのため比較的高分解能を持った焦点距離が1 m 程度の直入射型可視分光器がよく使用される。多数の光ファイバを入口スリットに縦に配置することにより空間分布を波長の関数として出口スリット上にイメージを結像させることが容易になる（空間分布計測）。従来から検出器としては IL と CCD もしくは PDA を組み合わせたシステムが利用されている。IL はアルカリ金属を主体とする光陰極（Photocathode）に照射し微弱光を光電子に変換し、MCP で増幅し、それを蛍光膜でさらに可視光に変換するガラス容器で真空封じされた可視光増幅器である。その後ろに PDA や CCD を直接接続して画像を記録する。増幅率は IL に印加する電圧によって調整することができる。このシステムで得られた可視スペクトルを Fig. 2(a) に示す。図には可視域スペクトルでもっとも強度の大きい2本の線スペクトル（H α :6563 Å, CIII:4647–4652 Å）を示した。スペクトルは CHS ヘリカル装置の NBI プラズマ（中心溫度：約 0.5 keV）で得た。使用した分光器は1 m 直入射分光器（回折格子：1200 本/mm）であり、検出器（IL+PDA:1024 ch, 25.4×6 mm²）は常温である。

一方、背面照射型 CCD は浜松ホトニクス製 S7030-1008 (1024×250 pixels, 24.576×6.000 mm²) を使用した。用いた可視分光器は50 cm 直入射分光器であるが、1800 本/mm の回折格子を用いているほか、通常の50 cm 直入射分光器よりも少し分散が大きいので上記の1 m 直入射の場合に比べて分解能という点で大きな遜色はない。スペクトルの一例を Fig. 2(b) に示す。データは LHD (Large Helical Device) の NBI プラズマから得たものである。検出器は通常–40℃ 程度に冷却して使用するが、この場合には常温でデータを取得した。スペクトルは上記と同じ H α および CIII である。両者を比較して明らかに異なる点はスペクトルの分解能 (FWHM) である。放射強度の強

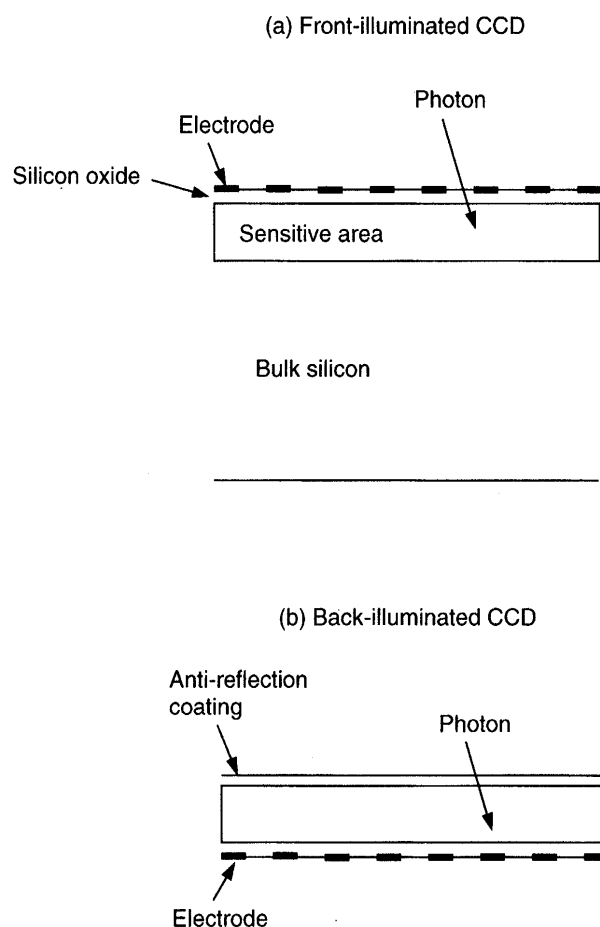


Fig. 1 Principles of front- and back-illuminated CCDs.

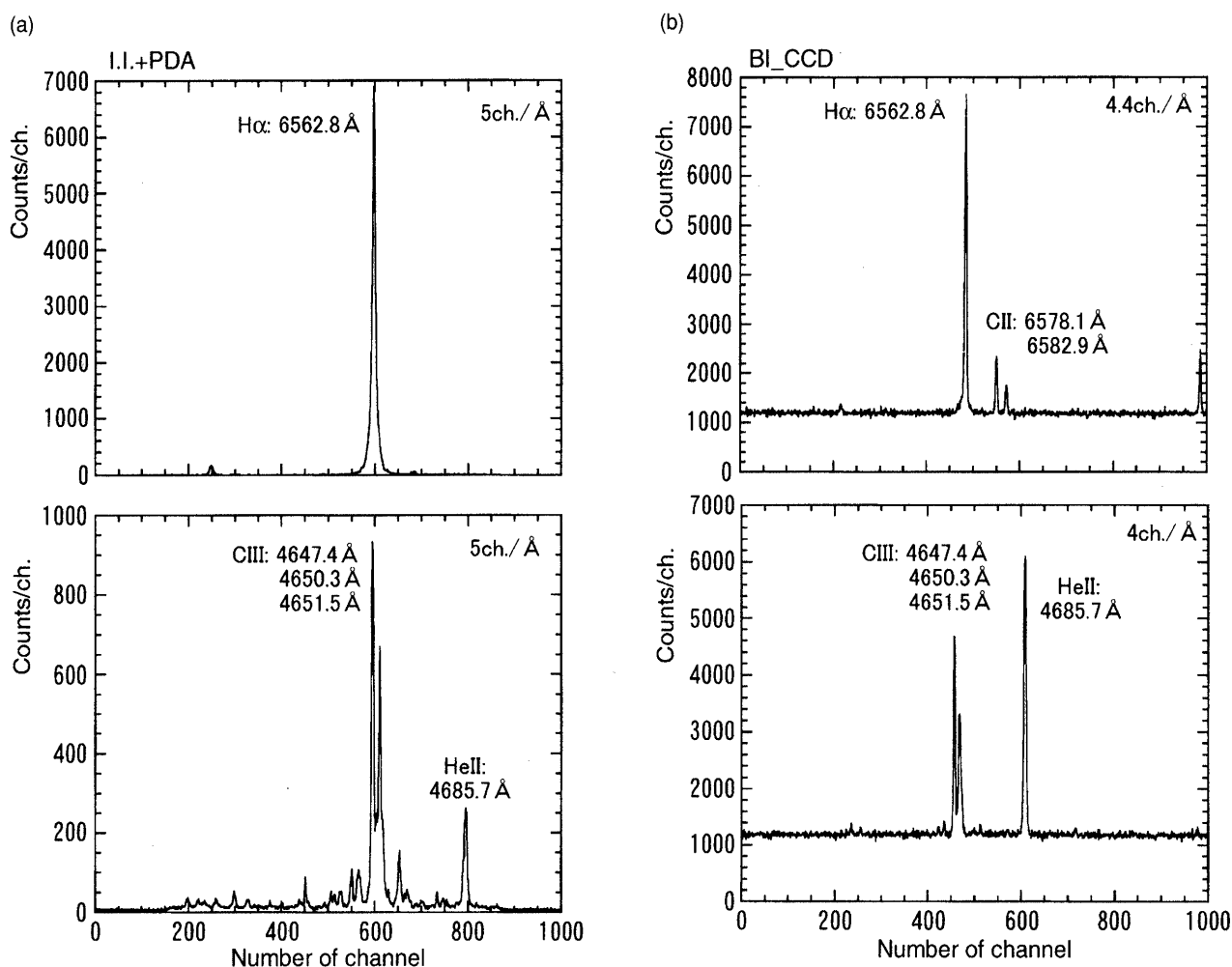


Fig. 2 (a) Visible spectra of H α and CIII obtained using a combination of I.I. and PDA. The data are taken from CHS NBI plasmas. (b) Visible spectra of H α and CIII obtained using back-illuminated CCD. The data are taken from LHD NBI plasmas.

い H α をみると明瞭にわかる。II 付の場合には FWHM は 7.5 チャンネルであるのに対して、背面照射型の場合には 4.5 チャンネル程度であり、その差が II の影響となる。波長方向における 1 チャンネルあたりのピクセルの大きさは両者ともほぼ同じである (25 μm) のでおよそ 75 μm 程度の違いとなる。通常 MCP に入射した光は電子増倍後蛍光膜の時点で 75–100 μm 程度に広がる。したがってその 75 μm という分解能の差は II に起因していると考えて間違いない。また、バックグラウンドの揺らぎであるがこれは背面照射型の方がはるかに少ない。ここで示したスペクトルは常温の CCD と比較してあるが、 -40°C 程度に冷却するとバックグラウンドノイズは 1 チャンネルあたり数カウント以下となる (例えば 50 ms 露光時)。また、検出器上のある場所での放射強度が極端に大きい時 (例えば多チャンネルファイバを用いて強いガスパフを伴った H α トロイダル分布計測を行う場合)、II の場合にはその周りのデータがすべてだめになるが、

CCD 検出器の直接使用の場合には基本的に過大な強度のファイバチャンネルが飽和するだけで他のファイバチャンネルはすべて有効となる。

II を使用した従来型の検出器を念頭において背面照射型 CCD の長所を可視分光計測の観点からまとめると以下ようになる (可視の場合、前面照射型 CCD の長所とも重複する点が多い)。

- (1) 位置分解能がはるかに高い (CCD の各素子の大きさ (ピクセルサイズ) に相当)。
- (2) 冷却時にはバックグラウンドノイズが圧倒的に少ない。
- (3) 感度の経時変化がほとんどない (II の場合は 1 年の使用でかなり劣化する)。
- (4) 過大な光 (例えばレーザー) を入射しても壊れないので取り扱いが非常に容易。
- (5) 前面照射型 CCD と比較しても感度はかなり高い。

3.4 真空紫外分光

真空紫外光（定義は曖昧だがおよそ $2000\text{ \AA}$ 以下）はガラス窓を透過しないので II を利用することができない。そこで従来の計測方法では、検出器を II に換えて MCP 自身を真空分光器に設置し光の増倍のために用いる。MCP に直接真空紫外光を入射し、そこで発生した二次電子を MCP により増倍した後、蛍光膜により可視光に変換し CCD もしくは PDA で記録する。通常 MCP は $1700\text{ \AA}$ あたりに二次電子を放出しなくなり感度を失うので測定領域はそれ以下の波長となる。MCP と PDA（浜松ホトニクス製, 1024 ch , $25.4 \times 5\text{ mm}^2$ ）で構成された検出器と 20 cm 直入射分光器を組み合わせたマルチチャンネル真空紫外分光器を製作した。それを使用して CHS の NBI プラズマから得た VUV スペクトルを Fig. 3(a) に示す。一度に観測できる波長範囲が $400\text{ \AA}$ 程度なので放電ごとに波長を掃引し、それらのスペクトルをつなぎ合わせた結果を示してある。短波長側の $400\text{ \AA}$ 付近でスペクトルの強度が小さくなるのは分光器の感度がなくなる（回折格子の反射率が小さくなる）ことによる。また、OVII ($1623\text{ \AA}$, $1640\text{ \AA}$) より長い波長領域では二次光しか観測されず、MCP ではそのあたりが感度の限界となっているのは明白である。

次に同じ 20 cm 直入射分光器に背面照射型 CCD 検出器 (EEV47-20: 1024×1024 ch, 13.3×13.3 mm²) を取り付けて LHD の NBI プラズマから放射される VUV スペクトルを観測した。結果を Fig. 3(b) に示す。CCD 単体でも真空紫外光が首尾よく検出されている。検出器は -40℃ に冷却されているのでバックグラウンドノイズはほとんどなく、図に見られるかなり大きなバックグラウンドはプラズマからの連続光と分光器の迷光による。Fig. 2(a) と比べて一見してわかる違いは可視分光の場合と同様、各スペクトル線の分解能である。特に強度の大きなスペクトル線の裾野の部分が、MCP 使用の場合極端に広がる傾向にあることがわかる。これはもともと MCP 自身の空間分解能が 100 μm 程度であることと MCP で増倍された電子雲がその出口のところで広がることによる。Fig. 3(b) では 400 Å 以下のスペクトルも観測されているが、このあたりはそれぞれの回折格子による反射率の違いがかなり大きいので MCP と比較した感度を議論するのは適切ではない。しかしながら、CCD の長波長側の感度は MCP と比較してはるかに良く、ほとんど可視域まで連続して十分な感度を有している。

Fig. 1で説明したように通常背面照射型CCDには表面にある種のコーティングが施されている。一般に販売さ

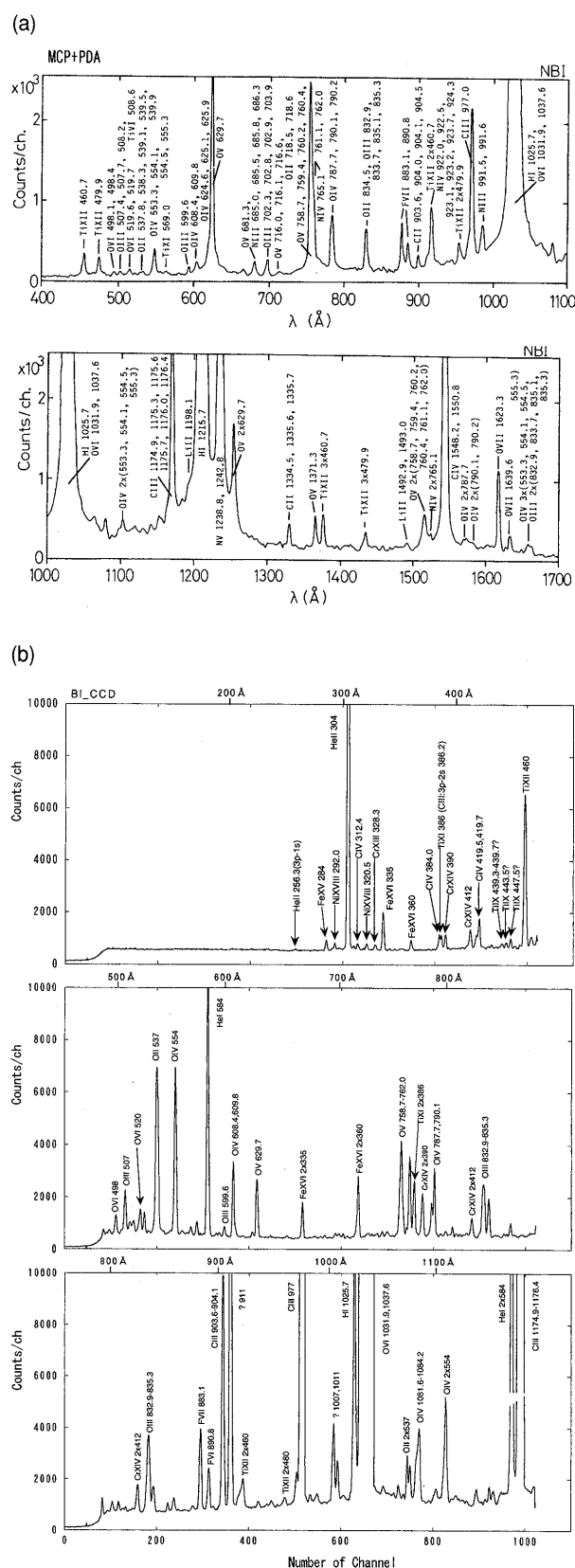


Fig. 3 (a) VUV spectra obtained using a combination of MCP and PDA. The data are taken from CHS NBI plasmas. (b) VUV spectra obtained using back-illuminated CCD. The data are taken from LHD NBI plasmas.

れているタイプはこの形式のものであり, 当初それを直接真空紫外領域に適用し, 分光計測を開始した. 結果としてほとんどスペクトルを観測することができず, 当時は構造が企業秘密になっていることもあり原因もはっきりとは突き止めることができなかった. 得られた結果を Fig. 4 に示す. 上図(a)は浜松ホトニクス社製背面照射型 CCD (基本的には可視で用いた CCD と同じ) を用いた結果であり, 下図(b)は前述と同じ EEV 社製の CCD からの結果である. 明らかなように(a)の場合には CCD の表面に何らかのコーティング (この辺りは企業秘密らしく情報は手に入らない) が施されており, 真空紫外領域ではほとんどスペクトルを観測することはできなかった. 経験を経て次第にわかってきたことであるが, 真空紫外領域で CCD 検出器を直接利用するには表面処理が施されていないものを慎重に選択する必要がある. 以上真空紫外

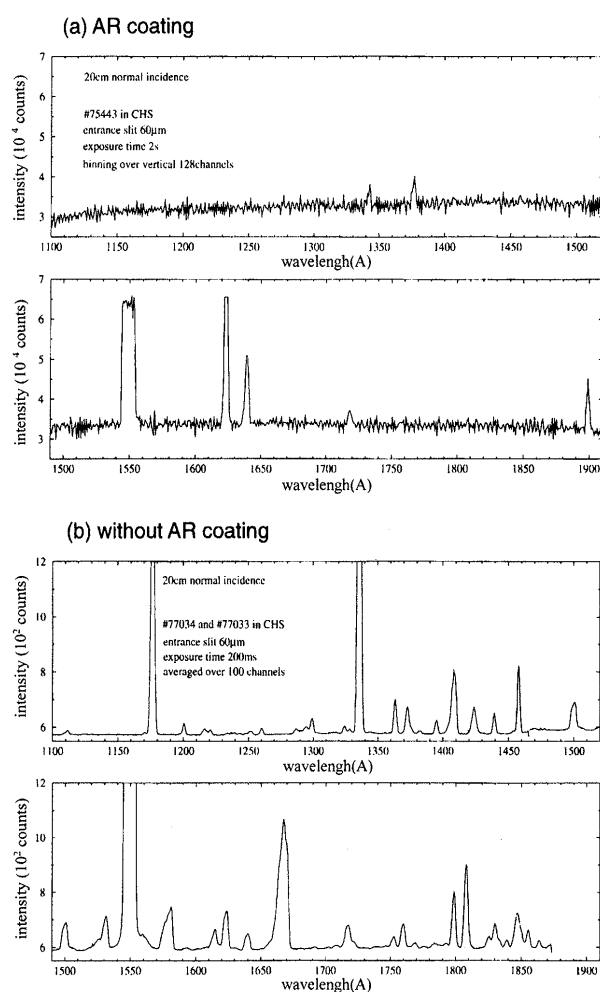


Fig. 4 Comparison of VUV spectra between coating and non-coating back-illuminated CCDs. The data are taken from CHS NBI plasmas.

領域での CCD 検出器使用の利点をまとめると

- (1)真空紫外領域全域にわたって感度を有している.
- (2)検出器部分の真空度をさほど気にする必要がない.
- (3)MCP と違い大気開放を繰り返しても感度の変化がなく, 長期の使用による経時変化もない.
- (4)空間分解能 (10–25 μm) が MCP (75–100 μm) と比較して格段に優れている.
- (5)バックグラウンドノイズが小さいのでダイナミックレンジをかなり大きく取ることができる (通常16ビット).
- (6)可視光にも感度を有するため, CCD で分光器の結像状態をイメージモードで直接観測することが可能となった. 煩雑な回折格子等の光軸調整が格段に簡単となった.

唯一と思われる欠点は MCP と違って可視光にも十分な感度を有するので, 分光器の迷光対策は十分に行う必要がある.

3.5 X 線分光計測

プラズマ計測において X 線分光を行う場合には波長分解能を向上させるために結晶分光器を用いる. 結晶分光器の主な役割はプラズマ中心部のイオン温度を計測することである. 磁場閉じ込め装置に存在する金属不純物 (チタンや鉄) から放射される X 線スペクトルは 1–4 $\text{\AA}$ (3–10 keV) 付近に存在するので, これまではその波長領域で検出感度が高く大きな検出面積を有する多芯比例計数管がよく用いられていた. 多芯比例計数管は自作するのが普通で, 我々も窓面積 $80 \times 50 \text{ mm}^2$ を有する検出器を

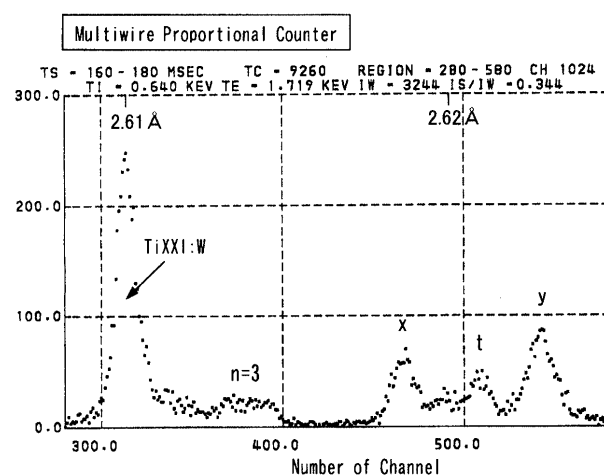


Fig. 5 X-ray spectrum of heliumlike TiXXI obtained using multi-wire proportional counter. The data are taken from JIPPT-IIU ohmic discharge.

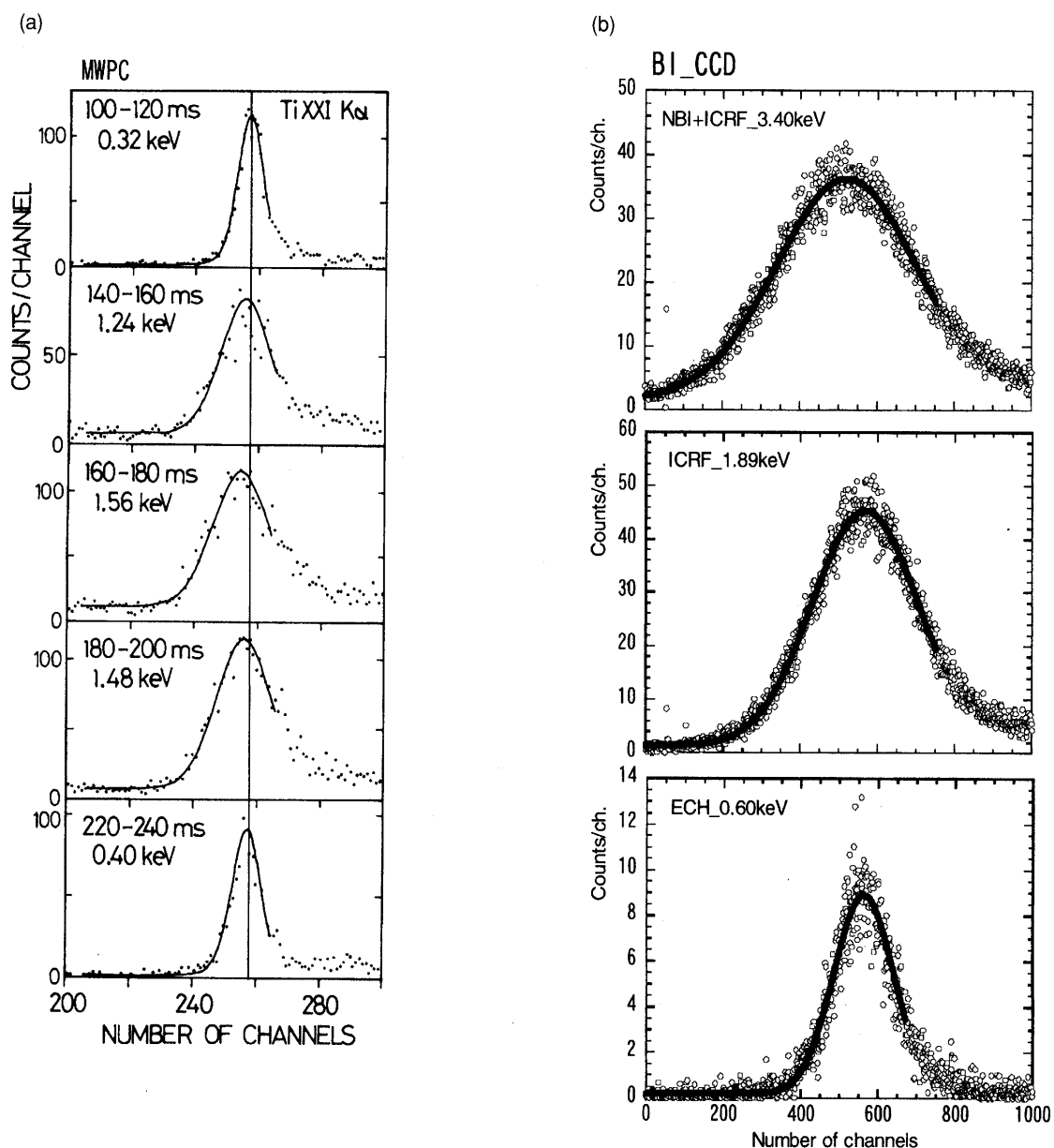


Fig. 6 (a) Doppler broadening of TiXXI x-ray line measured using multi-wire proportional counter. The data are taken from JIPPT-IIU ICRF plasmas. (b) Doppler broadening of TiXXI x-ray line measured using back-illuminated CCD. The data are taken from LHD plasmas.

製作した。それを3mヨハン型結晶分光器（結晶：Quartz）に取り付け、JIPPT-IIU トカマクのオーミックおよびICRF加熱プラズマから放射されるX線スペクトル（TiXXI）を観測した。一例をFig.5に示す。比例計数管の場合、バックグラウンドノイズは特別な事情（硬X線や中性子）がない限りほとんど皆無である。一般的に多芯比例計数管の空間分解能は100–200 μm である。我々の場合、空間分解能は150 μm であったため読み出し回路を200 $\mu\text{m}/\text{ch}$ と設定した。図の2.61 $\text{\AA}$ に位置するヘリウム様チタンの共鳴線を利用してドップラー拡がりを

観測した例をFig.6(a)に示す。このデータはFig.5と同様、JIPPT-IIUのICRF加熱が行われている間のスペクトル形状の変化を示す。加熱中にイオン温度が1.56 keVまで上昇していることを示すが、同時にプラズマ電流とは反対方向に20 km/s程度の速度でトロイダル回転も生じていることがわかる。この計測で多芯比例計数管の最大の欠点は計数率が低いことであった。TAC（Time-to-Amplitude Converter）を使用しておおよそ100 kHz、DAC（Digital-to-Amplitude Converter）を使用しておおよそ500 kHzが最大である。図のように20 msごとにデー

タをサンプリングすると検出できる全カウント数は DAC 利用の場合でも最大 10 k カウントに制限される。また局所的な計数率の上昇（つまり線スペクトルの強度の上昇）とともに比例計数管の空間分解能は劣化していくので常に監視を必要とした。

同じ仕様の結晶分光器に背面照射型 CCD 検出器 (EEV 47-20: 真空紫外の場合と同じ) を取り付け同じ TiXXI を LHD プラズマにおいて観測した結果を Fig. 6(b) に示す。データをフルビンニング (Full binning: CCD の Y 軸情報をすべて足し込み X 軸情報のみとすること) して実質上一次元アレイとして使用している。CCD のピクセルサイズは $13 \mu\text{m}/\text{ch}$ なので先ほどの比例計数管の場合と比べて単位波長あたり約 15 倍のチャンネル数を有する。計数特性は比例計数管の場合 1 フォトンにつきほぼ 1 カウントであったが、この CCD の場合 4.8 keV 付近で 1 フォトンあたりおおよそ 100 カウントである。CCD の場合 1 フォトンあたりのカウント数が大きくなるので実質的に統計精度が向上する。CCD 検出器の計数率はビット数で決まっておりサンプリング時間とは関係がない。ここで使用した CCD は 16 ビットなので計算上 1 チャンネルあたり 65 k カウント計数可能である (実際には 48 k カウントで飽和した)。つまりサンプリング時間を短くすればするほど 1 秒あたりの総計数率は飛躍的に増大する。また、空間分解能はカウント数が飽和するまで一定であり、局所的に計数率が増大しても影響されない。LHD では検出器を多芯比例計数管から背面照射型 CCD に変更した結果、計測手間と計測精度が飛躍的に向上した。以上 X 線分光計測での背面照射型 CCD の利点をまとめると

- (1) X 線強度は電子温度（電子温度の指数関数）と電子密度（密度の 2 乗）に強く依存するので常に検出器

に大きな直線性（ダイナミックレンジ）が要求されるが、サンプリング時間を調節することにより計数率を飛躍的に増大させることが可能となる。

- (2) 空間分解能（波長分解能）が計数率に依存しない。
- (3) (比例計数管のように) 磁場の影響を受けない。

等があげられる。欠点は現在のところ大きな X 線用 CCD 検出器（例えば $50 \times 100 \text{ mm}^2$ ）の製作が実質上困難なことから、背面照射型 CCD の場合有感部の厚さが $10 - 20 \mu\text{m}$ 程度であり 5 keV を超えると透過率が大きくなり感度が低下することである。

3.6 まとめ

背面照射型 CCD 検出器をうまく利用すると従来では不可能であった X 線領域から赤外領域までを一つの検出器で測定することが可能となる。例えば本来原理的には同じ構造を持つ直入射分光器も検出器の違いで実質的に異なる分光器のように扱われてきた。しかしながら両者を満足する背面照射型 CCD を使用すれば 1 台の分光器で計測を済ますことができる。斜入射用の回折格子で上述したようなことを行えば一気に X 線領域を除くすべての波長領域を 1 台の分光器でまかなうことは十分可能となる。そうならば各分光器にまたがって苦勞していた感度較正やスペクトル線の強度比の測定精度が飛躍的に向上することとなり、便利さだけではなく研究の上でも大きな前進となろう。また、今までスペクトルの分解能を向上させるため、否応なく分光器の大型化を行ってきたが今後コンパクトな分光器でも高い分解能を追及することも可能となる。いずれにしても背面照射型 CCD 検出器の登場で各種分光器の設計やプラズマ分光に新たな展開が期待されよう。