

セシウムテルライド薄膜フォトカソード

杉山 陽栄*

Cesium Telluride Thin Film Photocathode

Harue SUGIYAMA*

Abstract

This article describes physical characteristics of the cesium telluride thin film as a photocathode material for an RF electron gun. The electron gun using the photocathode is also overviewed at the beginning of the article. The performance of photocathode in relation to a elemental ratio of cesium and telluride and to an electron affinity are discussed in detail referring new results obtained from recent studies in addition to accumulated knowledge, especially from the viewpoint of applications.

1. はじめに

本稿では、はじめにフォトカソード電子銃について概観した後に、高周波電子銃用のフォトカソード材料であるセシウムテルライド薄膜について述べる。次に、現在までに分かっている事を、さらに最近の研究結果を応用的な観点から参照し、組成比や電子親和力に関連したフォトカソード材料としての性質について述べる。

2. フォトカソード電子銃

近年、電子加速器における電子ビームは、高い電荷量を持ち、かつ低エミッタンスであるなどの高品質を要求されることは当たり前になりつつある。フォトカソード電子銃において、高い電荷量を得るためには、光電子を生成するレーザー光の強度を上げるだけでは十分でなく、高い電界強度で電子を引き出すことが必要である。真空へ脱出した電子は、クーロン力によって互いに斥力を与え合うとともに、電子が走ることにより周りにできる磁場による効果を受けることになる。このようなクーロン力による効果と右ねじの法則の効果の合わせた空間電荷効果の影響を大きく受ける電子を、生成の初期に高い電界強度で引き出し、早く相対論的エネルギーにすることが、高輝度・低エミッタンス電子ビームを生成する際に重要である。

フォトカソードの性能の重要な指標として量子効率

が使われる。フォトカソードにおける量子効率($Q.E.$)とは、光電効果によって真空準位を越え、かつ真空へ脱出した電子数 (n_e) と、照射したレーザー光の光子数 (n_p) の比 ($Q.E. = n_e/n_p$) と定義されている。高い電荷量と小さなビームサイズが同時に要求される場合には、高電界の他に高い量子効率のフォトカソード材料が必要になる。

高輝度・低エミッタンスに加えて、国際リニアコライダー計画 (ILC) のような次世代高エネルギー素粒子物理学実験においては、電子のスピンが同じ方向に揃っている (偏極している) 電子ビームが要求されている。現状技術のスピン偏極電子ビーム源であるガリウム砒素 (GaAs) 半導体を用いたフォトカソード電子銃は、直流型の電子銃 (DC 電子銃) に限られているだけでなく、電子親和力を負にする表面処理 (NEA 表面処理, NEA: Negative Electron Affinity) を必要とする。電子親和力とは、半導体の伝導帯下端から真空準位までのエネルギー差に相当する量である。「負」の電子親和力と表現されるのは、真空準位が価電子帯下端よりも低い状態にあるためである。真空準位が負とは言え、通常、NEA 表面処理を施した GaAs 半導体フォトカソード材料においては、そのエネルギー差は 0.1 eV 程度以下と小さい。一方、50% を超える高いスピン偏極度の電子ビームを生成するためには、GaAs 半導体の価電子帯上端内のスピン状態の縮退を解き、一方の準位から電子を選択的に伝導帯

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: harues@post.kek.jp)

底すれすれへ励起する必要がある。GaAs 半導体を用いたスピン偏極ビーム源では、真空準位すれすれの負の電子親和力に対し、伝導帯下端へ電子を励起するため、高いスピン偏極度と余剰エネルギーが殆んどない電子を真空側へ取り出すことが可能となる。しかしながら、バルク状態の GaAs 半導体を用いる場合、伝導帯下端の電子のエネルギー状態密度がほとんどゼロとなるため、量子効率が低くなる。これに対し、超格子構造を利用することで、伝導帯底付近のエネルギー状態を極小まで閉じ込め、かつ高い状態密度が得られ、極小の余剰エネルギーと高い量子効率の性能を両立するフォトカソードの提案がされている¹⁾。その他、パルスビーム生成の際、時間応答性能を劣化させる表面光起電力効果²⁾の追求など、基礎的な研究を含む研究開発が鋭意進められている。

現状技術の NEA 表面処理法は、原理的なところは 1960 年代に報告されたセシウム (Cs) と酸素 (O) を組み合わせた方法を踏襲している³⁾。この方法は GaAs 半導体表面を NEA の状態にするために、超高真空 ($\sim 10^{-8}$ Pa) を必要とする。電子を放出し続ける環境下で、この NEA の状態を保つためには、電子親和力の小さい半導体材料を利用する方法があるが、既存の加速器用の GaAs 半導体を用いた電子銃では、電極の近くに大排気量の NEG ポンプを配置するなどの手立てが有効であると考えられ、現在、DC 電子銃でのみ実現できる技術である⁴⁾。スピン偏極フォトカソード DC 電子銃は、高輝度・低エミッタンス電子ビーム源としてさらなる高電界化を目指した開発が進められている⁵⁾。

一方、高周波型電子銃 (RF 電子銃) は、無偏極電子ビームでも構わないが、高輝度・低エミッタンス電子ビームが必要な場合に採用される。RF により作り出される高電界によって電子を引き出すため、DC 電子銃で困難である引き出し電場の高電界化が比較的容易に実現できる。RF 電子銃が採用されている実験は加速器施設である場合が多いが、ハイパワー高周波技術が既存であるからという理由が大きいであろうと考えられる。程度の問題ではあるが、カソード部分で高電界を作り出せる RF 電子銃においては、レーザーのスポットサイズを絞ることやパルス幅を短くする事により、ビームサイズが小さく、かつ高いピーク電流の電子ビームを直接生成することができる。

RF 電子銃においては、DC 電子銃で必要となる電極としてのアノードは存在しない。アノードは無限遠ということになる。カソードと呼ばれるものも、高周波が電子の引き出しの向きときだけカソードにな

る。これにレーザー光を同期させて、フォトカソードとする。DC 電子銃においては、常にカソードであったものが、RF 電子銃では、カソードがカソードではない時間があり、常にイオンバックボンバードメントに曝されるわけではないが、逆流イオンは高電界で加速されるため、そのエネルギーは大きい。現状技術の常伝導の RF 電子銃においては、スピン偏極フォトカソード材料が必要とする極高真空を実現することができない。一方で超伝導高周波加速空洞を用いた RF 電子銃⁶⁾では、空洞全体が低温に冷やされることにより極高真空が得られるので、スピン偏極 RF 電子銃の実現が期待できる。常伝導のスピン偏極 RF 電子銃を実現するためには、高真空程度で実現するスピン偏極フォトカソード材料の開発と極高真空を必要としない NEA 表面処理法を見つけ出す必要がある。本稿では、セシウムテルライドを NEA 表面処理の候補とした研究についても述べるが、一口にフォトカソード電子銃と言っても、DC 電子銃と RF 電子銃は越えなければならない技術が異なる。

その他、実際のフォトカソードを使った電子ビーム発生では、レーザーの不安定性があり、また、フォトカソード材料の取扱いの難しさがあるため、高い電荷量や低エミッタンスなどの高品質電子ビームが必要ではない場合には、必ずしもフォトカソード電子銃が有利であるわけではない。照射するレーザー波長も、金属やセシウムテルライド薄膜を用いる場合は非線形結晶光学系を必要とする近紫外領域の光を、ガリウム砒素系などのエネルギーギャップが小さい材料を用いる場合には近赤外線領域の波長の光を使う。こうした波長の光は目に見えにくく、高強度であることから安全上の対策も必要となる。さらに、RF 電子銃の場合は、レーザーパルスと高周波を高い精度で同期させる必要もある。フォトカソード電子銃は、複雑で高度な技術を必要とするため、用途や設置場所、既存技術をよく検討し選択する必要がある。

3. セシウムテルライド薄膜フォトカソード

セシウムテルライド薄膜をフォトカソード材料に用いた RF 電子銃は、1990 年代より実用化されている⁷⁾。現在では、多数の実験でセシウムテルライド薄膜が採用されている⁸⁾。国内においても、KEK-ATF の実験で使用されているように、長年のビーム運転に耐えた実績を有し⁹⁾、既に、RF 電子銃用のフォトカソード材料としては、枯れた技術と言える領域にあり実用的である。

セシウムテルライド薄膜フォトカソードは、1950

年代より真空管のフォトカソードとして研究されている¹⁰⁾。1970年代に全電子収量や光電子分光測定を行った報告があり、エネルギーギャップが3.3 eV、電子親和力が0.2 eV程度であることが記されている¹¹⁾。電子親和力が0.2 eVと低いことから、低エミッタンスフォトカソード材料としても使用可能であるが、現状技術ではレーザーの波長を自由に選ぶことができず、真空準位付近の運転はまだ報告例がない。

RF電子銃に用いられるセシウムテルライド薄膜の量子効率、酸化膜のない清浄な銅を用いたフォトカソードが 10^{-4} 程度であるのに対して、 $10^{-1}\sim 10^{-2}$ 程度であり2~3桁程度高い。また、高い量子効率を維持する時間も長い。KEK-ATF実験で用いられているRF電子銃においては、セシウムテルライド薄膜は1年に1回以下程度の成膜で高い量子効率が維持されている¹²⁾。フォトカソード電子銃の業界で、寿命と呼ばれているものの定義が曖昧であるが、フォトカソードの表面処理や成膜をしなくても運転に耐える量子効率が維持できることを寿命と定義するのであれば、セシウムテルライド薄膜の寿命は長く、金属フォトカソードと比べても遜色がないと言える。

使用する実験によって、セシウムテルライド薄膜の作製方法は微妙に異なるが、大雑把に言うと、真空蒸着法によってテルル(Te)の薄膜を成膜した後、セシウム(Cs)を蒸着する方法で成膜される。半導体薄膜としては、成膜が容易であると言える。細かい品質を問わなければ、乱暴な作製方法を取っても薄膜を成膜できる。セシウムテルライド薄膜は、可視光域で透明に近いので人の目で光の干渉が見える面白い材料である(図1)。薄膜を用いたフォトカソードでは、量子効率に膜厚依存性がある。セシウムテルライド薄膜の場合、最も高い量子効率を得られる膜厚は、はじめに蒸着したTe膜厚が10 nm程度のときである¹⁴⁾。Teの膜厚は薄膜作製時に水晶振動式膜厚計で測定されているが、Csは水晶振動式膜厚計で測定することが困難であるため、最も量子効率が高くなる全膜厚は正確には明らかではないが、はじめに蒸着したTe膜厚の2.5倍程度であるとされている¹⁵⁾。光学定数や誘電率が不明ではあるが、薄膜でありまた可視光域の光に対して透明に近いので、基板として用いるカソードプラグのカソード面の反射率も量子効率に反映される。薄膜を通過した光がカソードプラグの表面で反射され、再び薄膜を通過する際にも、励起光として働くからである。このため、カソードプラグを含むフォトカソード材料としては、カソードプラグ材料の反射率が高いほど量子効率が高い傾向を示す¹⁶⁾。しかし、

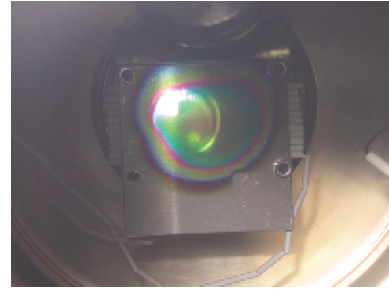


図1 名古屋大学にあった量子効率測定装置の中の写真。モリブデンの板(50 mm 四方)にセシウムテルライド薄膜を作製したもの。シャボン玉に映る薄膜の干渉のような模様が見える。可視光の干渉が見える程度に写真の薄膜は不均一である。この薄膜のTe膜厚は50 nmで、フォトカソード材料として使用するセシウムテルライド薄膜としては、膜厚が厚く、量子効率も低いため適さない。Cs蒸着中に見える色はどんどん変化していく。文献13)より転載。

セシウムテルライドの光学定数が真空の光学定数と同一ではないため、必ずしも、量子効率が基板材料の真空に対する反射率に比例するわけではない。また、電子銃はソレノイド電磁石に取り囲まれるため、非磁性材料であるモリブデンをカソードプラグの材料として用いることが多い。モリブデンは、セシウムテルライド薄膜に照射するレーザー光波長266 nm付近で高い反射率を有するが、さらに高い量子効率が求められた場合は、カソードプラグの材料の反射率も検討課題となる。蒸着した金などの基板材料も試験されている¹⁷⁾が、金は266 nm付近での反射率はモリブデンよりも低く¹⁸⁾、高い量子効率を得る目的には適さない。しかしながら、蒸着した金を用いると、難切削材料であるモリブデンを用いるよりも表面粗さを小さく抑えることができる。高電界用のカソードプラグとしては、カソード面の表面粗さも考慮すべきパラメータである。

加熱によるセシウムテルライド薄膜の除膜には550℃以上程度の温度が必要になるため、RF電子銃システムにおける除膜は容易ではない。RF電子銃には、通常、挿入するカソードプラグとRF空洞本体との電氣的コンタクトをとるために、ベリリウム銅製のコンタクトフィンガーが装着されている。ベリリウム銅は、ばね材料として一般的に使用される材料である。300℃前後程度で硬化処理の効果を失うため、除膜に加熱洗浄法を用いるとコンタクトフィンガーが弾性を失ってしまう。こうした理由からセシウムテルライド薄膜を採用すると、現状技術では、除膜にイオンスパッタリング法などを採用しなければならず、蒸着槽の

汚染を避けるために除膜槽を分けるなど、装置が複雑になる。また、除膜を行わないことを選択すると、真空槽内に複数のセシウムテルライド薄膜付きのカソードソケットの在庫を持つなどの方法が必要で、超高真空装置が多軸化・大型化した複雑なものとなり、取扱いが容易ではなく、価格的にも安価でなくなってしまう。

3.1 STF の RF 電子銃用のセシウムテルライド薄膜フォトカソード装置

除膜の困難さを解決するために、現在、KEK-STF に建設中の RF 電子銃で用いるカソードプラグには、高温耐性が高い材料であるインコネル 750 が採用される。インコネル 750 を採用することで、加熱洗浄法が可能となる。インコネル 750 製のコンタクトフィンガーの高温試験が待たれる (図 2)。この他、カソードプラグの移送が単軸化されており、シャフトガイドに低摩擦係数材料である二硫化タングステン膜を施したリングを採用するなどし、超高真空薄膜準備装置の簡素化・低価格化がはかられている。現在、RF 電子銃の立ち上げ作業と同時に薄膜準備装置 (図 3) の立ち上げ・動作試験が進行されている。

3.2 セシウムテルライドの組成比

セシウムテルライドの化学式は、通常、 Cs_2Te と表記される。化学的には、アルカリ溶液中で Cs_2Te 分子が生成できる。周期律表上の Cs と Te の関係は、水素 (H) と酸素 (O) の関係と同じであり、 Cs_2Te も H_2O と同様に極性があることが推測できる。セシウムテルライドは、作製温度を制御すると様々な組成比を取ることができる (図 4)²⁰⁾。 5×10^{-5} Pa 程度の高真空下で Te 薄膜に Cs を蒸着すると、観察時間 (少なくとも数秒) 以内に急速な反応が起こり、セシ



図 2 KEK-STF 実験用に構築中の RF 電子銃に用いるカソードプラグの写真。写真右下の面がカソード面で、その周りに王冠のように取り巻いているインコネル 750 製のコンタクトフィンガーが見える。セシウムテルライド薄膜作製後に量子効率測定を行うため、電気的に浮いていなければならず、アルミナの碍子を用いて先端部は浮かされている。先端部付近にヒーターを内蔵するため、エア抜き穴が多数ある。文献 19) より転載。

ウムテルルオキサイドが生成することが、透過電子顕微鏡内のその場蒸着・観察法によって観測されている²¹⁾。この実験では、成膜時の真空度がよくないため酸化物となっているが、室温での成膜においても Te と Cs が反応することが報告されている。

ここで、実際にセシウムテルライド薄膜の組成比を測定した結果について述べる。九州シンクロトロン光研究センター内の佐賀大学専有ビームライン BL13-

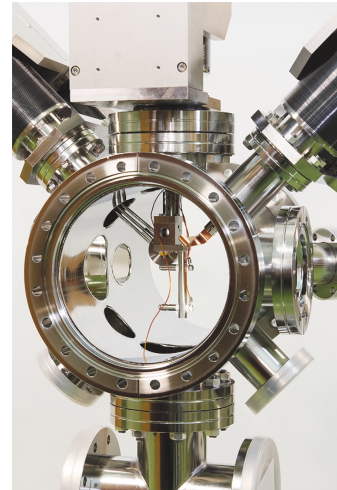


図 3 KEK-STF 実験用に構築中の RF 電子銃に用いるセシウムテルライド薄膜の蒸着槽の写真。蒸着槽内部に構築中の蒸着源や Te 膜厚を測定する水晶振動子膜厚計センサーヘッド、量子効率測定時に必要となるバイアス用のコンタクトが見える。文献 19) より転載。

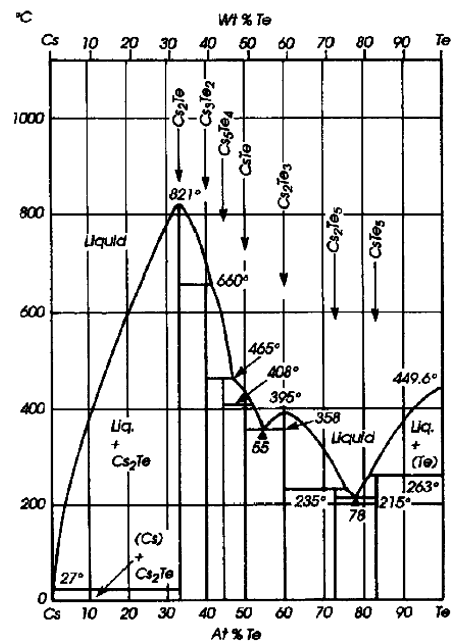


図 4 セシウムテルライドの相図。文献 20) より引用。

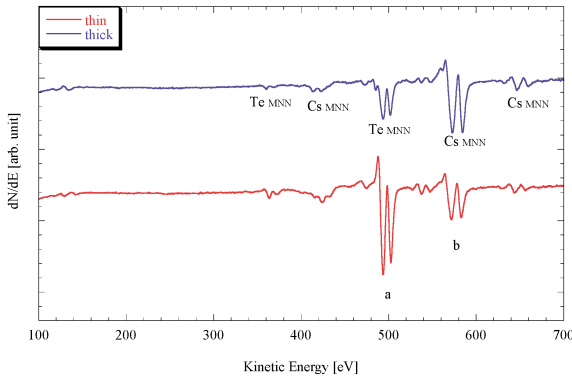


図5 セシウムテルライド薄膜のオージェ電子スペクトル。

PGM ステーションにおいて、作製した2サンプルについて行ったオージェ分光測定の結果より見積もった組成比について述べる。2サンプルともに、基板には市販のモリブデン板を使用した。 3×10^{-8} Paの超高真空槽内にて550°Cの加熱洗浄を施した基板を使用している。薄膜作製時の基板温度は室温である。Teを蒸着したのちにCsを蒸着する方法で成膜した。Te源はニラコ社製の99.9999%のTe小片を使用した。Cs源はサエスゲッターズ社製のアルカリ金属ディスペンサーを使用した。2サンプルともに、薄膜の作製方法は、Teの膜厚以外は積極的に変えていない。本装置でのTe膜厚の誤差は数十%程度であると見込まれる。

図5にセシウムテルライド薄膜のオージェ電子分光測定の結果を示す。グラフ上側(青線)のスペクトラムはTe膜厚である20 nm(全厚は50 nm)のサンプルで、下側のスペクトラム(赤線)は、Te膜厚が1 nm(全厚は数 nm)のサンプルある。2サンプルともに酸素(O)や炭素(C)などの汚染は測定限界以下である。

図5のCsとTeのMNN遷移の最も深いピークa, bからその組成比を見積もる。以下は、正しい整数比で出すことはできないため、概算ではあるがだいたいの見積もりを行う。CsとTeの断面積比は、およそCs:Te=1:5である²²⁾。測定されたピーク値b:aは、Te膜厚1 nmサンプルで1:3、Te膜厚20 nm程度のサンプルで7:5程度である。断面積を考慮するとCs_xTe_yは、Te膜厚20 nmサンプルでCs₇Te、Te膜厚1 nmサンプルでCs₅Te₃となる。Te膜厚が厚いとCsがTe薄膜の中により多く蒸着される。詳細なメカニズムを解明するには至っていないが、図4に示した相図を参考にすると、Cs₇Teとなったサンプルは、室温での成膜であったことから、Cs₂Teに過剰

なCsが蒸着されていることになる。同じ作製方法を用いたCs₅Te₃となったサンプルは、逆にCsが少ない。いずれのサンプルもCsの蒸着方法は同様で、最初に蒸着したTe薄膜の膜厚が違うだけである。

BL13-PGMステーションに構築した蒸着槽は、装置の構造上の制約から、蒸着中のTe膜厚を正確に測定することが困難であった。また、この装置では、蒸着中の基板温度も制御しておらず、蒸着源からの放射が基板の温度を変化させている可能性もある。薄膜作製時にこれらのパラメータを制御することが課題として残されている。

3.3 セシウムテルライド薄膜のエネルギーダイアグラム

前節に述べた2サンプルについて、放射光を用いて行った光電子分光測定の結果を示す。九州シンクロトロン光研究センターのBL13-PGMステーションでは、数eVから150 eV程度の光(可視光から真空紫外光)を使用することができる²³⁾。測定に使用した光のエネルギー(hν)は30 eV程度で表面敏感な領域の光を使用した。一般に、光電子分光測定は、物質内の電子の状態密度を調べるために行うが、ここでは、エネルギー差のみに着目するため、使用した光のエネルギーの絶対値は重要視しないこととする。測定に使用した分析槽は、準備槽と同じく 3×10^{-8} Paの超高真空槽である。

図6に価電子帯上端付近の光電子スペクトルを示す。横軸は光電子の運動エネルギーを、縦軸はスペクトル形状のみを比較するために規格化した強度を示している。図6(a), (b)はそれぞれCs₇Teの成膜から2日後の、Cs₅Te₃の成膜から4日後のスペクトルである。2サンプル間で、フェルミ準位と価電子帯上端の位置が違うのがわかる。価電子帯上端はフェルミ準位よりもCs₇Teでは2.5 eV、Cs₅Te₃では0.5 eV低い運動エネルギー側にある。

図7に真空準位に相当するカットオフ付近のスペクトルを示す。横軸は比較上のエネルギーを示している。サンプルに-25 Vのバイアス電圧を印加している。このバイアス電子は、光電子アナライザーに効率よく電子が収集されるようにするためと、空間電荷効果によってサンプルに電子が滞留するのを防ぐためである。横軸の0 eVは運動エネルギーが25 eVに対応し、光電子アナライザーの真空準位を示している。図7(a), (b)はそれぞれCs₇Teの成膜から2日後の、Cs₅Te₃の成膜から4日後のスペクトルである。カットオフは、Cs₇Teでは-2.7 eVを、Cs₅Te₃では-3.0 eVを示している。

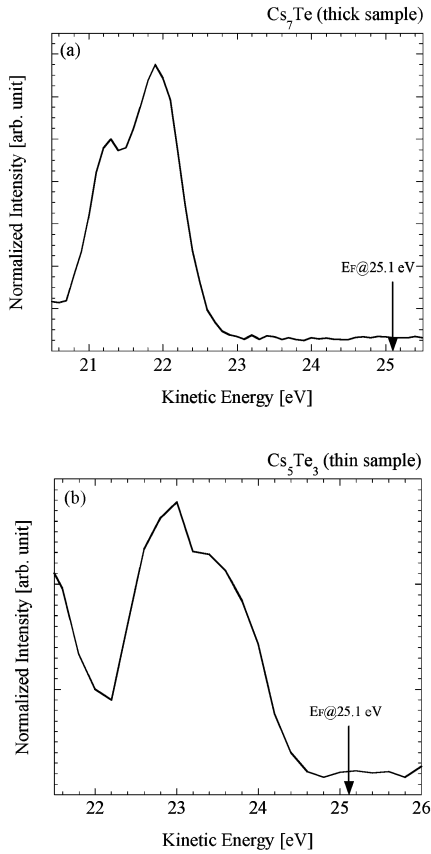


図6 セシウムテルライド薄膜の価電子帯上端付近の光電子スペクトル。(a)はCs₇Te, (b)はCs₅Te₃のもの。

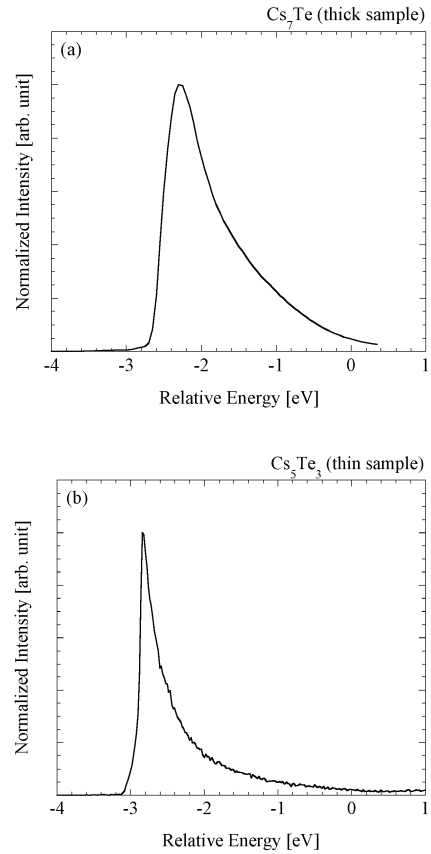


図7 セシウムテルライド薄膜の真空準位端付近のスペクトル。(a)はCs₇Te, (b)はCs₅Te₃のもの。

図6と図7をまとめたエネルギーダイアグラムを図8に示す。また、比較としてエネルギーギャップの文献値である3.3 eV¹¹⁾を引用した。本実験では、エネルギーギャップは測定していない。引用したエネルギーギャップとフェルミ準位の関係から、図8(a)はn型を、図8(b)はp型を示していることがわかる。イオン性物質のベークンシーを考慮すると、電気的に負や正に偏る現象として理解できる²⁴⁾。一般的に、フォトカソードとして用いる場合、n型よりもp型の方が電子を放出しやすくなるためTeの膜厚やCsの濃度を制御し、p型半導体とするよう作製方法を工夫する研究が必要である。膜厚が薄いと光を吸収する層が少なくなるため、量子効率が低くなりトレードオフが生じる。電子親和力について、図8(a)に1.1 eV、図8(b)に-1.2 eVと入れているが、組成比が変わるとエネルギーギャップも変化することから、正しい値とは考えにくい。しかしながら、図8(b)に示したサンプルは、NEAを示す表面処理方法の候補となるため、研究を進めている。

3.4 セシウムテルライド薄膜の長耐久化の研究

次に、セシウムテルライド薄膜の電子親和力が成膜

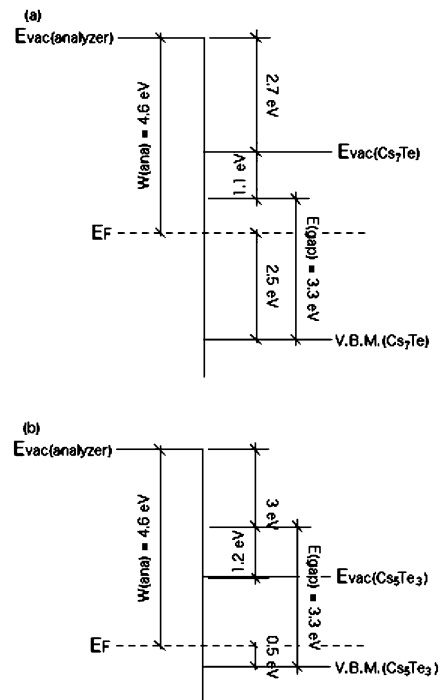


図8 光電子分光測定の結果のまとめと、文献11)のエネルギーギャップ3.3 eVの比較。(a)はCs₇Te, (b)はCs₅Te₃のもの。

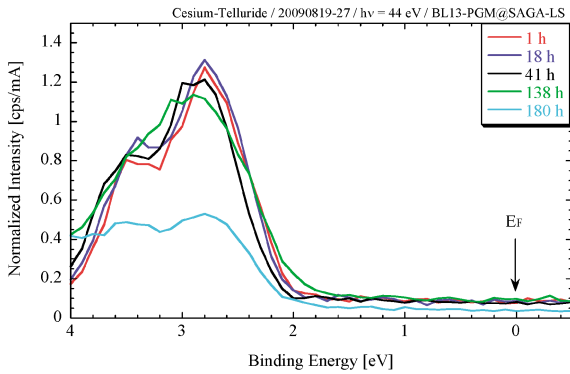


図9 価電子帯上端付近の光電子スペクトル。成膜1時間後から180時間後までの時間変化。0次光照射前。

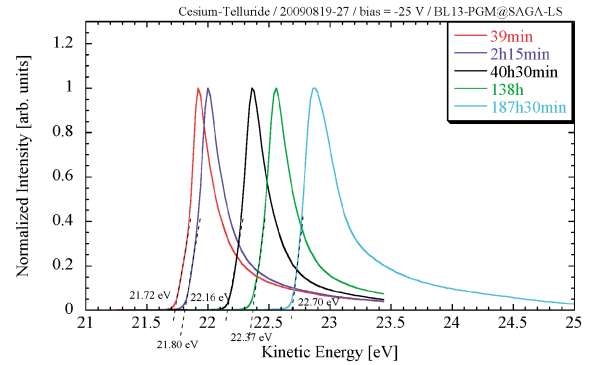


図11 真空準位付近のスペクトルの時間変化。成膜1時間後から180時間後までの時間変化。0次光照射前。

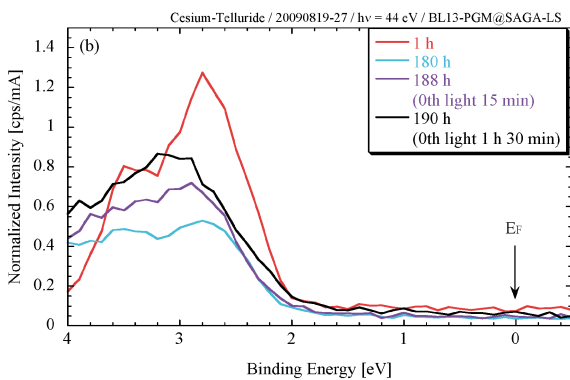


図10 価電子帯上端付近の光電子スペクトル。0次光照射前後の変化。

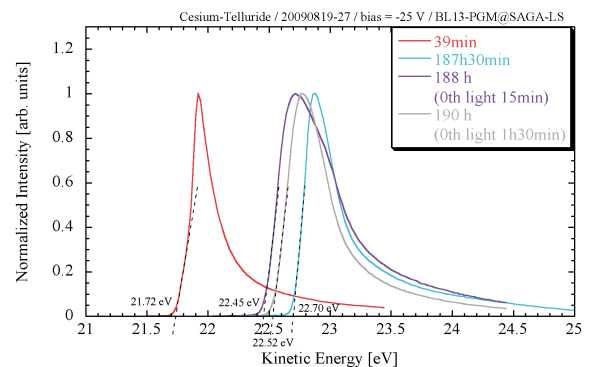


図12 真空準位付近のスペクトルの時間変化。0次光照射前後の変化。

からの時間によって、経時的に高い方向へシフトすることを述べる。電子親和力が高くなると、同じ波長のレーザーを使用する場合、量子効率が低下することに相当する。シンクロトロンからの分光しない0次光を薄膜に照射することによって、光脱離効果によるものと考えられる電子親和力の経時的シフトが低い方へ回復したという測定結果について述べる。一般に、RF電子銃ではカソードプラグを挿入した後にRFプロセスを行うが、この時、フォトカソード材料は電子ビームを引き出す以前に甚大なダメージを受ける。そのため、RFプロセスの後でもカソードをリフレッシュできる方法が待望される。

本実験も、九州シンクロトロン光研究センターのBL13-PGMステーションにてセシウムテルライド薄膜を成膜し、光電子分光測定の実験データを採取した。前節と前々節に述べたサンプルとは別のサンプルを使用している。試料は一度エアロック槽へ移送している。分析槽、試料準備槽の圧力が $\sim 10^{-8}$ Paであるのに対して、ペーキングを行っていないエアロック槽の圧力は $\sim 10^{-5}$ Pa程度であり、水が多く残留しているもの

と考えられる。従って、エアロック槽へ移送すると、サンプル表面は残留ガスによる汚染が激しく起こることが予想できる。

図9-10にセシウムテルライド薄膜の価電子帯上端付近の光電子スペクトルの時間変化を示す。横軸は束縛エネルギーである。価電子帯上端は、時間変化がほとんど見られないことから、エネルギーギャップもほとんど変化していないと仮定することができる。図11-12に真空準位付近のスペクトルの時間変化を示す。図7に示したデータと同様に -25 Vバイアス電圧を印加している。図11-12では、そのまま電子の運動エネルギーを横軸に取っている。価電子帯上端がほとんど変化しないのと比較すると、真空準位は大きく変化している。この変化は電子親和力の変化であると考えられる。図9と図11は0次光の照射前、図10と図12は0次光の照射前後のグラフである。照射は、はじめに0次光を15分間照射し、その直後に光電子分光測定を行った後、さらに1時間30分照射している。15分間の0次光照射後では、電子親和力は 0.25 eV低い方へシフトした(0次光を照射

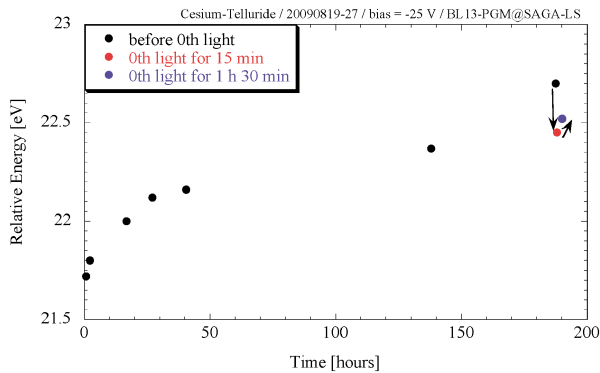


図13 電子親和力の時間変化.

した直後に行っているため、伝導帯へ励起された電子の緩和が十分ではないために、スペクトル形状が、他のスペクトル形状よりも幅が大きい). この0.25 eVの変化は、光脱離効果によって起こったものと考えられ、フォトカソードの量子効率に大きく寄与する電子親和力を回復できる可能性を示す結果であると言える. その後さらに1時間30分の0次光照射を行ったが、このときは、0.1 eV程度高い方へシフトした. この原因としては、電子を多く放出することによる表面汚染が考えられる. 図13に横軸に成膜からの経過時間を取った電子親和力の変化を示す. 150時間以上のところに不連続な変化が見られる. この不連続な変化は、試料を分析槽からエアロック槽へ移送したことが影響しているものと考えられる. エアロック槽へ移送する前の電子親和力の変化は対数的な変化であったものが、再び分析槽へ戻して測定した際には、不連続な変化となっている. 0次光の照射によって対数的な曲線上に戻っている. 以上の結果から、水などを多く残留している真空槽内での汚染について、光脱離効果が有効であることがわかる. 今後、X線管などを用いた、RF電子銃における簡易なフォトカソード材料のリフレッシュ法へ応用が可能かどうかの研究を進める.

4. おわりに

本稿のDC電子銃のためのフォトカソード材料について述べた箇所は、理化学研究所の西谷智博氏にご指南頂いた内容が多く含まれている.

本稿に示した実験データは、佐賀大シンクロトロン光応用研究センターの鎌田雅夫氏、高橋和敏氏、東純平氏、小川浩二氏との共同研究として発表済みのものである.

最後に、加速器学会誌編集委員の方々に、この機会を与えて頂いたことを感謝致しております.

参考文献

- 1) Tomohiro Nishitani, Masao Tabuchi, Yoshikazu Takeda, Yuji Suzuki, Kazuya Motoki, and Takashi Meguro, *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 06FF02 (2009).
- 2) Shinji Tokudomi, Junpei Azuma, Kazutoshi Takahashi and Masao Kamada, *J. Phys. Soc. Jpn.* 77, 014711 (2008).
- 3) A. A. Turnbull and G. B. Evans, *J. Phys D* 1, 155 (1967).
- 4) M. Yamamoto, T. Konomi, S. Okumi, Y. Nakagawa, N. Yamamoto, M. Tanioku, X. Jin, T. Ujihara, Y. Takeda, F. Furuta, H. Matsumoto, M. Yoshioka, M. Kuriki, C. Shonaka and T. Nakanishi, 18th International Spin Physics Symposium, AIP Conference Proceedings 1149, 987 (2009).
- 5) 羽島良一, 永井良治, 西森信行, 山本将博, 本田洋介, 武藤俊哉, 宮島 司, 桑原真人, 奥見正治, 中西彊, 飯島北斗, 栗木雅夫, 第23回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 9P010 (2010).
- 6) F. Staufenbiel, D. Janssen, T. Kamps, U. Lehnert, U. Lehnert, D. Lipka, P. Michel, J. Teichert and R. Xiang, *Nucl. Instrum. Methods A* 584, 259 (2008).
- 7) S. H. Kong, J. Kinross-Wright, D. C. Nguyen and R. L. Sheffield, *J. Appl. Phys.* 77(11), 6031 (1995).
- 8) 例えば <http://flash.desy.de/>
- 9) N. Terunuma, A. Murata, M. Fukuda, K. Hirano, Y. Kamiya, T. Kii, M. Kuriki, R. Kuroda, H. Ohgaki, K. Sakae, M. Takano, T. Takatomi, J. Urakawa, M. Washio, Y. Yamazaki and J. Yang, *Nucl. Instrum. Methods A* 613, 1 (2010).
- 10) E. Taft and J. Apker, *J. Opt. Soc. Am.* 43, 81 (1953).
- 11) R. A. Powell, W. E. Spicer, G. B. Fisher and P. Gregory, *Phys. Rev. B* 8, 3987 (1973).
- 12) 照沼信浩氏 (KEK 加速器, ATF) 私信.
- 13) 杉山陽栄, 博士論文 (名古屋大学), 2005. <http://hdl.handle.net/2237/11581>
- 14) 杉山陽栄, 小早川久, 竹田美和, 高嶋圭史, 浪花健, *日本金属学会誌*, 69(No4), 392 (2005).
- 15) P. Michelato, C. Pagani, D. Sertore, A. di Bona and S. Valeri, *Nucl. Instrum. Methods A* 393, 464 (1997).
- 16) 杉山陽栄, 小早川久, 竹田美和, 高嶋圭史, 浪花健, *日本金属学会誌*, 69(No6), 493 (2005).
- 17) H. Trautner, PhD. Thesis, CLIC Note 428 (2000).
- 18) E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, (1985).
- 19) <http://lcdev.kek.jp/Archives/index20091119.php>, <http://lcdev.kek.jp/Archives/index20091217.php>
- 20) E. A. Brandes and G. B. Brook, *Smithells Metals, Reference Book*, 7th edition, Butterworth-Heinemann (1992).
- 21) 加藤一八, 卒業論文 (神戸大学), 2010.
- 22) *Handbook of Auger Electron Spectroscopy*, 3rd Edition, Φ PHYSICAL ELECTRONICS, ISBN: 0964812401.
- 23) H. Sugiyama, K. Takahashi, K. Ogawa, J. Azuma and M. Kamada, Activity Report, Synchrotron Light Application Center, Saga University, 2005–2007, 106, ISSN 1883–1370.
- 24) S. M. Sze and Kwok K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd Edition, WILEY, ISBN 0471143235.