

高周波電子銃用セシウムテルライドフォトカソードの研究

杉山 陽栄^{1,A)}、古田 史生^{B)}、木村 健一^{A)}、小早川 久^{A)}、高嶋 圭史^{A)}、中西 彊^{B)}、
奥見 正治^{B)}、和田 公路^{B)}、山本 将博^{B)}、西谷 智博^{B)}、宮本 延春^{B)}、
桑原 真人^{B)}、山本 尚人^{B)}、浪花 健一^{B)}、渡辺 修^{A)}、守屋 健太^{A)}

A) 名古屋大学大学院工学研究科
〒464-8603 名古屋市千種区不老町

B) 名古屋大学大学院理学研究科
〒464-8602 名古屋市千種区不老町

概要

高周波電子銃用セシウムテルライドフォトカソードの量子効率の偏光特性と膜厚特性について研究を行った。セシウムテルライドの量子効率は、P偏光照射時はS偏光照射時を上回り、P偏光で入射角度が60度のとき最大値を取る。量子効率(QE)と反射率(R)の関係を $QE = 1-R$ と仮定し、量子効率の測定結果からセシウムテルライドの光学定数(屈折率、減衰係数)を見積もった。量子効率の膜厚依存性測定においても同様の関係を仮定することにより、セシウムテルライドの最適膜厚に関する考察を行った。

1. はじめに

セシウムテルライドは高周波電子銃の半導体フォトカソードとしてCERNやLos Alamosにおける実験で使用されており、高い量子効率と安定した寿命を持つことが示されている^{[1][2]}。我々の研究においても、照射光波長250nmに対して量子効率が 10^{-1} 程度である。これは同じ波長に対する銅フォトカソードの量子効率が 10^{-4} 程度であったのに比べ3桁高い。またセシウムテルライドは基板が結晶である必要がなく、真空蒸着による成膜も容易に行うことができる。このようにセシウムテルライドは高周波電子銃用のフォトカソードとして優れた性質を持っている。

セシウムテルライドの高い量子効率を効果的に使用するためには、偏光している照射光に対する量子効率や、量子効率の膜厚がどのように影響しているかを知っておく必要がある。このために量子効率の偏光依存性と膜厚依存性の測定を行った。

照射光に対するカソード表面の反射率(R)と量子効率(QE)の間に $QE = 1-R$ の関係を仮定すると、偏光依存性の測定結果より、セシウムテルライドの光学定数を見積もることができる。この仮定と、そこから導かれる光学定数を用いてセシウムテルライドの最適膜厚値の予測を行った。

2. 光電流測定と成膜装置

図1に装置の概略を示す。真空度は 10^{-10} Torr程度である。この装置はセシウムテルライドを真空蒸着後、大気に取り出すことなく光電流値の測定を行うことができる。電流値測定の分解能は1pAである。光源はキセノンランプ用い、回折格子により単色化した紫外光を取り出し、合成石英窓を通してカソード表面に照射する。チャンバーから絶縁した基板に-100V印加することでカソードとしている。カソード基板は回転導入器により回転できる。カソード面を回転させることで、光の入射角度を任意に選ぶことができ、偏光に対する入射角度を変えての測定を可能にしている。量子効率は光の強度と光電流値より算出する。光の強度測定はシリコンフォトダイオードを用いた。

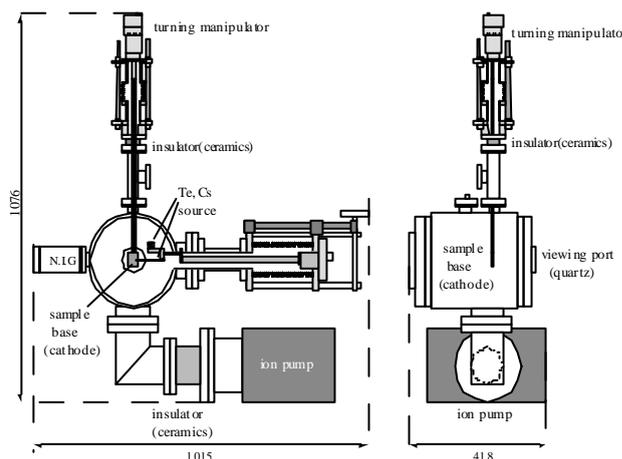


図1：実験装置の概要

セシウムテルライドの成膜は、600度のヒートクリーニングを終えた基板の上に、テルル、セシウムの順に蒸着する。蒸着温度は室温である。基板材料はモリブデンを用いた。テルルは電熱線バスケット内の小片を熱し蒸散させる。テルル蒸着量

¹ E-mail: sugiyama@nsr.numse.nagoya-u.ac.jp

は水晶振動子膜厚計で膜厚をモニターし制御している。セシウム蒸着源はクロム化合物を用いている。セシウムの蒸着量はモニターしている光電流値によって制御する。

3. セシウムテルライドの量子効率

3.1 直線偏光に対する量子効率

フォトカソード型高周波電子銃で通常運転時光源として使うのはレーザーである。レーザーはその発振原理から偏光している。本研究ではランプを使用しているが、紫外域グラントムソプリズムを用いて直線偏光を作りセシウムテルライドの量子効率の偏光依存性を調べた。図2に光の波長が250nm時の測定結果を示す。光の入射角度は正面からの入射、つまり直入射時を0度としている。P偏光照射時の量子効率はS偏光照射時を常に上回る。またP偏光照射時の量子効率の最大値は入射光角度が60度するときである。

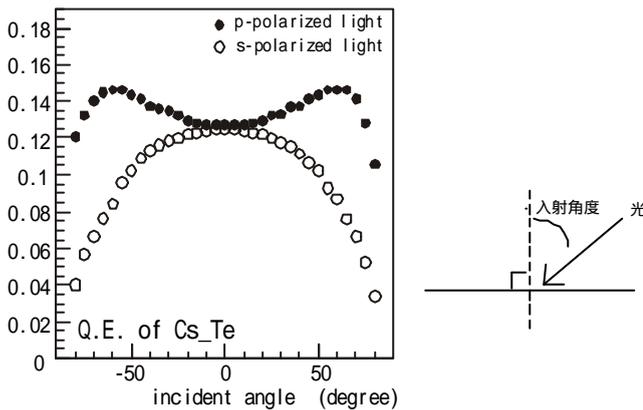


図2：偏光に対するセシウムテルライドの量子効率：●はP偏光、○はS偏光に対する量子効率。光の入射角度は正面入射つまり直入射時を0度とした。

3.1 量子効率の膜厚依存性

セシウムテルライドの量子効率は、セシウムテルライド薄膜の膜厚にも依存する。図3に250nmの光に対するセシウムテルライドの量子効率の膜厚依存性測定結果を示す。ここで示す膜厚は成膜時に測定したテルルの膜厚である。量子効率の最大値は膜厚が10nmのときである。10nmを超える膜厚については、量子効率が悪化する。

4. 考察：量子効率と反射率

4.1 量子効率と反射率

反射率は一般に光の偏光状態と入射角度により異なる。図4に、銅の量子効率の偏光特性を測つ

たものと、反射率(R)と絶対値を合わせるための適当な係数(f)を用いた $f \times (1-R)$ を比較したものを示す。銅の反射率はフレネルの反射公式より算出した。フレネルの反射公式に代入する光学定数はHandbook of Optical Constant^[3]の値を用いた。図4が示すように、量子効率(QE)と反射率(R)は $QE \propto (1-R)$ の関係が成り立つと言える。

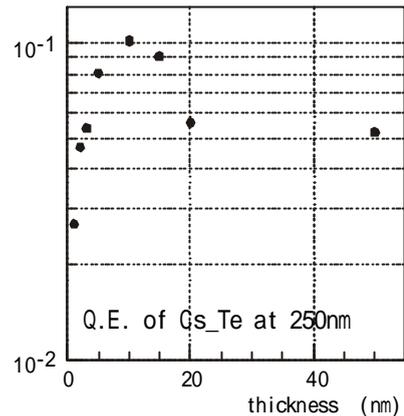


図3：セシウムテルライドの量子効率膜厚依存性：縦軸は量子効率、横軸は膜厚である。膜厚は成膜時のテルルの膜厚である。

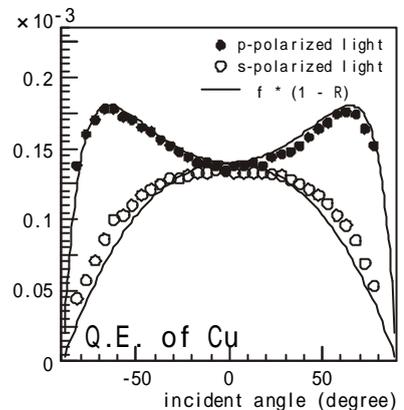


図4：偏光に対する銅の量子効率と反射率の関係：○は測定した量子効率、実線は反射率(R)と係数(f)を用いた $f \times (1-R)$ を示す。

4.2 セシウムテルライドの光学定数

$QE \propto (1-R)$ の関係を仮定しセシウムテルライドの光学定数の見積もりを試みた。セシウムテルライドの光学定数をフリーパラメータとしたフレネルの反射公式を使う。P偏光時の反射率を R_p 、S偏光時の反射率を R_s 、セシウムテルライドのP偏光時の量子効率を QE_p 、S偏光時の量子効率を QE_s と表す。量子効率と反射率は絶対値が異なるので、絶対値が相殺できる QE_s/QE_p 比を用い、 R_s/R_p 比でフィッティングを行った。基板に使用したモリブ

デンの光学定数はHandbook of Optical Constant^[3]の値を用いた。図5に示すように薄膜の干渉が考えられるため、多層膜の反射公式を使った。フィットの結果、照射光の波長250nmにおける光学定数は $n=3.3$ 、 $k=0.98$ 程度と見積もることができた。図6にフィットの結果を示す。

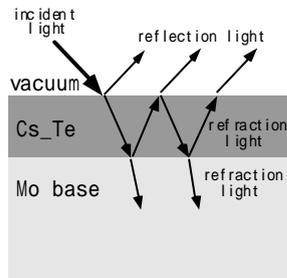


図5：真空とセシウムテルライド、セシウムテルライドとモリブデン基板の二つの界面を持つ反射

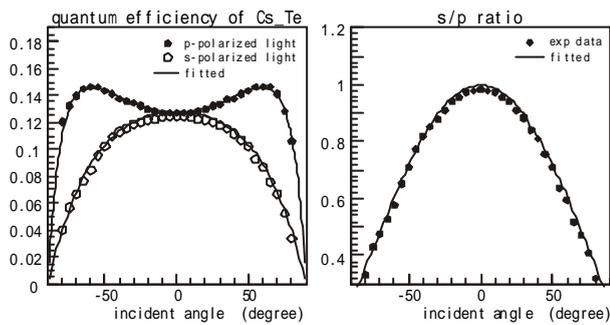


図6：フィットの結果：右図はフィットに使った QEs/QEp で実線がフィットされた Rs/Rp である。

4.3 膜厚に対する考察

膜厚依存の測定の際、膜厚が増せば量子効率は頭を打ち一定になることを予想していた。実際は膜厚が10nmを越えるあたりで量子効率は落ちる。ここでは量子効率と反射率の関係を $QE = f \times (1-R)$ と仮定し、セシウムテルライドの量子効率が最大値を取る最適膜厚について考察する。図7に250nmの光に対する量子効率の膜厚依存性の測定結果と $f \times (1-R)$ を比較したものを示す。セシウムテルライドの反射率には、偏光依存性測定結果より見積もった光学定数を使い、膜厚と照射光波長に依存する干渉を考慮している。量子効率と反射率は絶対値

が異なるため $1-R$ は適当な係数 f を用いノーマライズしている。図7が示すように、測定した最適膜厚値と $f \times (1-R)$ の最大値はそれぞれ10nm程度で一致する。最適膜厚値は $f \times (1-R)$ で見積もることができることを示すものである。

5. まとめ

セシウムテルライドの量子効率偏光依存性測定の結果、照射光の入射角度を0度から80度の範囲で変化した場合、P偏光照射時の量子効率はS偏光時を常に上回った。照射光波長が250nm時の量子効率の最大値は、P偏光照射において光の入射角度が60度の場合であった。

セシウムテルライドの量子効率膜厚依存性測定の結果、照射光波長が250nm時の量子効率の最大値は膜厚が10nmのときであった。

セシウムテルライドの量子効率について、 $QE = f \times (1-R)$ の関係を仮定すると、偏光依存性の測定より照射光波長が250nmでのセシウムテルライドの光学定数は $n=3.33$ 、 $k=0.98$ となった。さらに、この光学定数を用いることで照射光波長250nm時の最適膜厚値が10nm程度であることを算出した。これは、実験で得られた量子効率の最大値を与える膜厚とほぼ同じ値であり、この計算方法により最適膜厚の予測が行える可能性があることを示した。

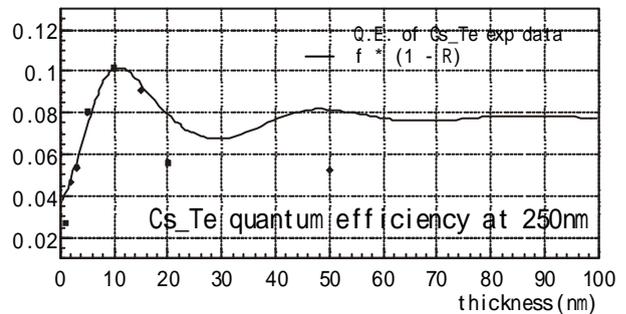


図7：照射光波長250nmに対するセシウムテルライドの量子効率の膜厚依存性測定結果と $f \times (1-R)$ の比較

参考文献

- [1] G.Suberlucq et al., CERN-PS-98-036-LP,1998
- [2] Steven H.Kong et al., LA-UR-94-2851,1994
- [3] E.D.Palik,Academic Press,Inc.1985