

セシウムテルライド薄膜フォトカソードの特性

杉山 陽栄

名古屋大学図書



11542270

目次

1	はじめに	3
1.1	フォトカソード高周波電子銃	4
1.2	高周波電子銃用フォトカソード材料	5
1.3	セシウムテルライド薄膜フォトカソードを用いた高周波電子銃	5
1.4	本論文の構成	6
2	実験装置	8
2.1	真空チェンバー	8
2.2	光源と光学系	9
2.3	光の斜め入射	12
3	セシウムテルライド薄膜の作製と量子効率測定	13
3.1	セシウムテルライド薄膜の作製	13
3.1.1	テルル蒸着	13
3.1.2	テルル膜厚測定のキャリブレーション	16
3.1.3	セシウム蒸着	18
3.1.4	セシウム蒸着とセシウムテルライド薄膜作製過程	18
3.2	量子効率の測定	22
3.3	量子効率の入射光エネルギー(波長)依存性	25
3.3.1	蒸着条件による量子効率入射光エネルギー依存性の変化	25
3.4	セシウムテルライド薄膜フォトカソードの寿命	28
4	直線偏光を用いた量子効率の入射光角度依存性	29
4.1	測定結果	30
4.2	セシウムテルライド薄膜からの光電子放出の考察	32
4.2.1	セシウムテルライド薄膜の膜厚と光学定数の見積もり	35
5	セシウムテルライド薄膜の量子効率膜厚依存性	39
5.1	測定結果	39
5.2	量子効率の入射光エネルギー依存性における膜厚依存性	41
5.2.1	閾値エネルギー以下の量子効率の考察	41
5.3	光電子放出モデルを用いた膜厚依存性の検討	43

6	セシウムテルライド 薄膜の量子効率基板依存性	47
6.1	モリブデン以外の金属基板	47
6.2	基板の表面粗さ	50
6.3	モリブデン基板の劣化	52
6.4	光電子放出モデルを用いた量子効率の基板依存の検討	57
7	まとめ	61
A	セシウムテルライド 薄膜の組成比	63

Chapter 1

はじめに

本研究はフォトカソード高周波電子銃の開発の一端を担うものである。フォトカソード材料、特に半導体薄膜フォトカソードであるセシウムテルライド薄膜フォトカソードの開発のための研究であり、その基礎研究に的をしぼった。

粒子加速器の発達は、高エネルギー素粒子物理学や放射光を利用した多くの分野での発展を支えてきた。初期の電子加速器においては、電子が出さえすればよしとされていたが、昨今、電子加速器に求められる電子ビームは高品質なものへと移行している。標準模型最後の未発見粒子であり、質量の起源であるヒッグス粒子の探索を目的とした、次期高エネルギー素粒子物理学実験である ILC (International Linear Collider、電子陽電子衝突型線形加速器、重心系エネルギー 1TeV) 計画 [1]、あるいは将来の放射光実験用加速器である ERL (Energy Recovery Lineac、エネルギー回収型ライナック) 計画 [2]、さらには X 線領域を目指す自由電子レーザー (FEL、Free Electron Laser) において、高輝度・短パルスの高品質な電子ビームは不可欠な要素である。フォトカソード高周波電子銃は、高輝度、短パルスの電子ビーム生成において有利であり、高強度・低エミッタンスが求められる線形加速器の入射器として有望視されるようになっている。

円形電子加速器からの放射光は材料科学、生物物理学、医学、工学、工業応用など多岐にわたる分野で利用されている。従来からの大規模な放射光施設だけではなく、大学や工場の現場に設置できる小型の放射光源も望まれるようになっている。放射光は大学や研究所における基礎研究のみならず、工業的にも応用が広がり、医療にも欠かせないものとなっており、小型の放射光源が求められている。名古屋大学においても小型の放射光実験施設計画、NSSR (Nagoya University Small Synchrotron Radiation Center) 計画 [3] が進められている。

さらに、もっと手軽で小型な紫外光源として、フォトカソード高周波電子銃を用いた超小型放射光源の可能性も示されている。フォトカソード高周波電子銃から得られた電子ビームを、大強度のレーザービームに衝突させ、逆コンプトン散乱によって、真空紫外から X 線領域の放射光を得るものである。この超小型放射光源を実現するためにも、フォトカソード高周波電子銃の開発が不可欠である。

1.1 フォトカソード 高周波電子銃

高品質な電子ビームとは、電荷量が多く、ビームサイズが小さく、バンチ間の電荷量のばらつきが小さく、バンチ間の時間構造がよく制御され、電子の運動量広がりが小さい、などの条件を備えた電子ビームである。ビーム中の粒子の縦(進行)方向あるいは横方向の広がりを表す物理量として、しばしばエミッタンスが使われる。座標 x (ビームの進行方向が z 方向) と運動量 P_x のつくる位相空間 (x, P_x) にビームを構成する粒子をプロットしたとき、その分布の面積をエミッタンスと呼ぶ。粒子は初期条件 (x_0, P_{x0}) で決まる位相空間内の楕円の上を運動する。個々の粒子は初期条件が異なるのでそれぞれの楕円の上に分布する。分布の形状はビームの進行とともに変化するが、エミッタンスは基本的には不変量である¹。エミッタンスが低いビームは高品質なビームとすることができる。エミッタンスは外力が働かない限り不変量であり、従って電子ビーム生成の初期におけるエミッタンスを低く抑えることが、高品質電子ビーム生成において重要な要素となる。

従来より電子ビーム源として直流型の熱電子銃がよく使われ、広く応用されている。熱電子銃はカソードを加熱し熱電子を発生させ、カソードにマイナスの電圧を印加し電子ビームを引き出すものである。熱電子銃でより多くの電子を発生させたい場合、熱カソードそのものを大きくすることになり、ビームのサイズも大きくなる。ビームのサイズを縮めるために電子を強く収束させると、横方向運動量が大きくなる。これはエミッタンスを増大させることにつながる。他にエミッタンスを低くするためには、空間電荷効果を小さくする必要がある。強度の大きなビーム中の粒子間の電磁氣的相互作用によって起こる効果を空間電荷効果と呼ぶ。同じ方向に進む同種粒子間には、クーロン力による斥力の他に、電流による磁場により引力が働く。ビームを構成する粒子の運動量が大きくなるとクーロン力は一定であるのに対し、磁場による引力は大きくなる。従って、空間電荷効果は、引き出す電子の運動量が大きくなると相対的に小さくなる。電子の運動量を大きくするためには、引き出し電圧を高くする必要がある。また短パルス電子ビームを取り出す場合、熱電子銃では、グリッド部分に高速のバイアス電圧をかけることになる。その後、サブハーモニックバンチャーとバンチャーを組み合わせて、電子ビームを加速しつつバンチ化することになり、制御が難しい上に、価格も装置も大規模なものとなる。

フォトカソード 高周波電子銃は、高周波加速空洞の一端にフォトカソードを備えた電子銃である。高周波高電界によって電子を引き出すため、直流型電子銃よりも高い電界をかけることができる。そのため高周波電子銃は直流型電子銃よりも引き出す電子ビームのエミッタンスを低く抑えることができる。フォトカソード 高周波電子銃は、フォトカソードに照射するレーザー光を時間的に、また、サイズの的に制御し、高周波高電界により電子を引き出し加速する。よって、電子ビーム生成の初期から低いエミッタンス、短い時間構造を持つ電子ビームを取り出すことが可能である。

¹実際には運動量成分を測定するのは困難であるから、通常 P_x の代わりに粒子のビーム進行方向との角度 x' を用い (x, x') 平面での粒子分布の面積をエミッタンスとする。このように定義すると、運動量の増加により、進行方向の角度は減少するのでエミッタンスは加速とともに小さくなる。これを加速器の場合には断熱減衰と呼んでいる。エミッタンスを ϵ 、粒子の速度を v 、光速を c とすると、 $\epsilon\beta\gamma$ ($\beta = v/c, \gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$) は加速によっても不変な値となり、規格化エミッタンスと呼ばれる。

1.2 高周波電子銃用フォトカソード材料

高周波電子銃用のフォトカソード材料としては、安定な寿命という観点からは金属が考えられる。たとえば高純度の銅材料は多くのフォトカソード高周波電子銃で採用されており、実績がある。しかし、量子効率が 10^{-4} 程度と低いため、大強度電子ビームを得ようとする、光源である紫外光レーザーへの負担が大きい。マグネシウム材料は量子効率がその数倍程度に改善されるので、実用化への研究が進められている段階である。

一方、半導体薄膜フォトカソードであるセシウムテルライド (Cs_2Te) やルビジウムテルライド (Rb_2Te) などは量子効率が 0.1 程度と高いのでフォトカソード材料として有望視され実用化されつつある。表 1.1 に高周波電子銃用フォトカソードとしてのアルカリ金属のテルル化物半導体薄膜フォトカソードの性能を示した。基板はいずれもモリブデンである。高周波電子銃に装着し電子引き出しを行うにつれ、量子効率が低下するが、表 1.1 中で寿命として示したものは量子効率が 2×10^{-2} まで低下するまでの時間である [4][5]。セシウムテルライド薄膜フォトカソードは高い量子効率を長く保つことができ、高周波電子銃用のフォトカソード材料として優れた材料であることが示された。セシウムテルライドは光電子増倍管の光電面として、また、ソーラーブラインド用のフォトダイオード材料として研究開発されてきた歴史を持つ物質である [6][7]。FEL における高周波電子銃用のフォトカソードとして用いられ、実用化されはじめてから 10 年余り経つ [8]。

フォトカソード材料	量子効率	寿命	真空度 (Torr)	光源波長 (nm)
金属	$10^{-6} \sim 10^{-4}$			266
K_2Te	0.9×10^{-1}	22 日間	5×10^{-10}	266
Cs_2Te	1×10^{-1}	20 ヲ月	6×10^{-10}	266
Rb_2Te	1×10^{-1}	1 週間	8×10^{-10}	266

Table 1.1: アルカリ金属テルル化物薄膜フォトカソード

1.3 セシウムテルライド 薄膜フォトカソードを用いた高周波電子銃

セシウムテルライドが高周波電子銃のフォトカソードとして高い量子効率と長い寿命という優れた特性持つことは、Kong らによる FEL 用の入射器の研究 (Los Alamos)[8] や、Sertore らなどによる DESY-TESLA 実験用のテスト実験であった TTF 入射器の研究 [9]、Chevallay らなどによる CERN-CLIC の入射器の研究 [10]、照沼ら [11] や、栗木らによる KEK-ATF 実験の入射器の研究 [12] によって示されている。KEK-ATF 実験において使用された高周波電子銃用セシウムテルライド薄膜については、名古屋大学での基礎研究をもとに実用化された [13]。

セシウムテルライド薄膜フォトカソードの量子効率、作製過程や真空の状態によって大きくかわることが報告されている [14]。これはカソード材料の表面状態、あるいは金属基板との界面における半導体バンド構造の変化などの影響が考えられ、複雑である。電子銃として実用に供するためには長時間の使用に対して性能が安定に保たれることと作製の際の再現性が十分に保証されなければならない。

フォトカソード高周波電子銃では、入射光をカソード面に斜めに入射(斜入射)させる方法も採用されている。これは垂直入射に比べて量子効率が高いことと、入射光路と電子ビーム軌道が干渉することが避けられるという利点があるからである。しかしながら、その際、量子効率などの性能は作製の条件や膜厚の誤差、入射角度の広がりなどによって微妙に変化することが考えられる。また、金属フォトカソードの場合は斜入射で量子効率が高いことはよく調べられているが、電子銃用セシウムテルライド薄膜の斜入射での光学特性は未知である。

1.4 本論文の構成

本論文では、本研究のために開発した、超高真空中でセシウムテルライド薄膜を作製し、量子効率を測定する実験装置についてまず述べ、次に実験結果とその考察を示す。セシウムテルライド薄膜は大気に触れる破損する [Appendix A 参照] が、本研究で開発した実験装置を用いると、作製したセシウムテルライド薄膜を大気に取り出すことなく量子効率の測定ができる。実験結果として、セシウムテルライド薄膜フォトカソードの量子効率の直線偏光した入射光の入射角度依存性、量子効率の入射光エネルギー(波長)依存性、量子効率の膜厚依存性、薄膜を作製する基板について述べる。また、セシウムテルライド薄膜の作製過程と量子効率の関係、蒸着条件の違いによる量子効率の変化についても述べる。

高周波電子銃用セシウムテルライド薄膜フォトカソードの他の研究では、セシウムテルライド薄膜を作製する際、基板温度を 100 °C から 120 °C に設定している [23][8]。しかし、本研究では薄膜作製中の基板温度は室温である。そのため室温で作製した際の作製過程について詳しく調べた。作製中の基板温度が室温であることから、薄膜作製時の蒸着条件は本研究独自のものである。セシウムテルライド薄膜の量子効率は、テルルやセシウムの蒸着量の微妙な違いや、用いる基板によって変化する。さまざまな蒸着条件について調べた。特に、テルルとセシウムの蒸着量に対する、セシウムテルライド薄膜フォトカソードの量子効率の変化について詳しく述べる。

セシウムテルライド薄膜フォトカソードの量子効率の入射光角度依存性については、系統的なデータは今までに報告されていない。本研究により、セシウムテルライド薄膜フォトカソードを用いた高周波電子銃の光の入射方法は、量子効率の観点からは P 偏光斜入射を採用する方が有利であることが確認できた。

高周波電子銃用セシウムテルライド薄膜フォトカソードの基板には、モリブデン基板を用いたセシウムテルライド薄膜フォトカソードは高い性能を示してきた実績がある。しかし、用いる基板材料の種類や基板の状態による量子効率の変化については、よく理解されていない。本研究によってセシウムテルライド薄膜フォトカソードの量子効率は、用い

る基板材料にも依存し、また、用いる基板の表面粗さにも依存することがわかった。

金属表面上に作製した単層薄膜からの光電子放出モデルを考案し、それを用いて考察を行った。このモデルはフレネルの反射公式をもとに薄膜と金属基板との境界面からの反射光も電子放出に寄与することを考慮したもので、量子効率が入射光の波長、入射光の偏光、入射光角度、そして薄膜の厚さに依存する。また、このモデルの考察から示唆される量子効率の膜厚依存性、用いる基板の反射率と量子効率の関係も調べた。セシウムテルライドの光学定数は未知である。セシウムテルライド薄膜の量子効率の入射光角度依存性の測定結果と、薄膜からの光電子放出のモデルから、セシウムテルライドの光学定数を導出した。このモデルと導出したセシウムテルライドの光学定数を用いると、量子効率の膜厚依存性の測定結果において、テルル膜厚が 10nm のときに量子効率がピークを作ることをよく説明できる。

Chapter 2

実験装置

2.1 真空チェンバー

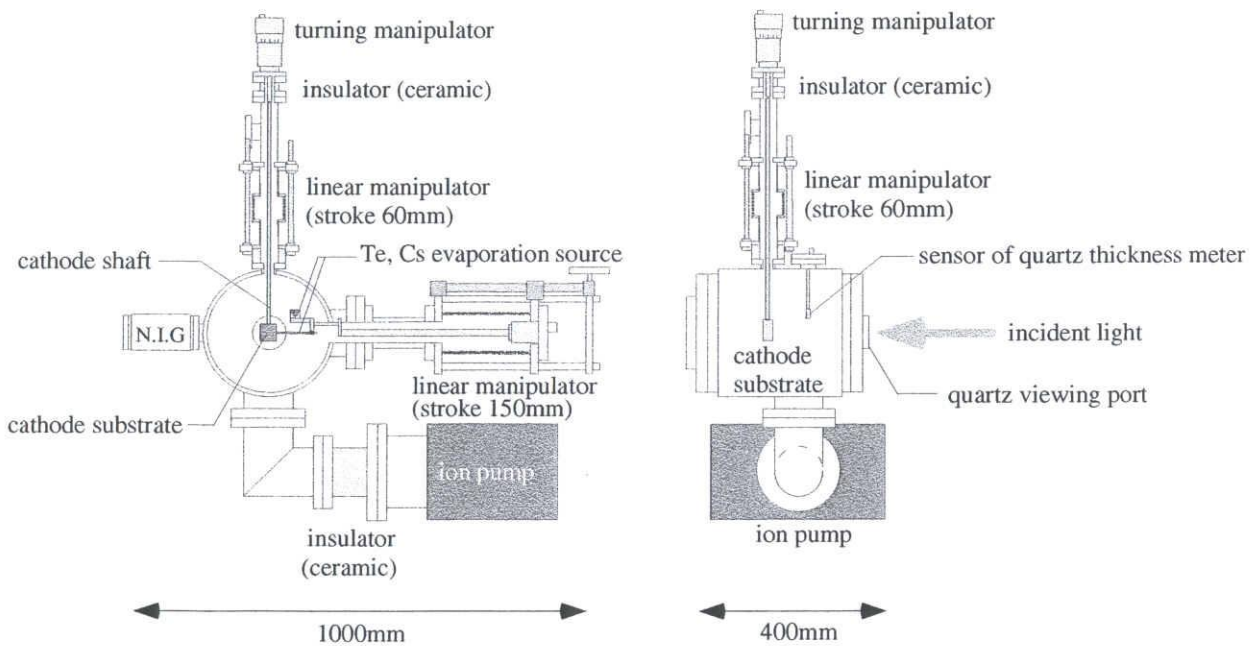


Figure 2.1: 実験装置概略

図 2.1に実験装置の概略を示す。本研究ではセシウムテルライド 薄膜を真空蒸着により作製し、作製したセシウムテルライド 薄膜フォトカソードの光電流値を測定できる、実験装置を開発し使用している。セシウムテルライド 薄膜は大気に触れると破損するが、本研究で開発した装置を用いると、作製したセシウムテルライド 薄膜フォトカソードを大気に取り出すことなく量子効率を測定できる。

真空生成はロータリーポンプとターボ分子ポンプによる粗排気を行いながらベーキングした後、イオンポンプによる本排気により行う。ベーキング温度は約 200°Cで、約9時

間かけて室温から 200°C まで上げ約 30 時間保ち、約 9 時間かけて室温まで戻す。真空度はベーキング終了後 3 日で約 2×10^{-10} Torr の超高真空に到達する。



Figure 2.2: 実験装置全体写真。写真手前が光学系。奥に真空チェンバーと計測系が見える。

2.2 光源と光学系

図 2.3 と図 2.4 に本研究に用いた光学系の概略と写真を示す。高周波電子銃用のセシウムテルライド薄膜フォトカソードは紫外光領域で使用される。通常、高周波電子銃などにセシウムテルライド薄膜フォトカソードを採用した実験の光源には固体レーザーの 4 倍高調波などが利用される [12]。本研究ではレーザーは使用せず、光源として高安定キセノン (Xe) ランプ¹ を使用している。キセノンランプはレーザーに比べパワーが小さいものの、紫外光領域から赤外光領域まで広範囲の連続で安定な光が得られる。本実験で用いたキセノンランプのパワーの不安定性は波長 250nm で 1% 程度である。ランプからの光は回折格子²を通して分光、単色化する。回折格子の材質はアルミニウム、グレーティン

¹浜松ホトニクス、L2273

²JOBIN YVON、H020UV

グが 1200/mm(ブレード 150nm、くさび型、曲率半径 224.3mm の球面)、分光範囲は波長 200nm~800nm(6.19eV~1.55eV) である。回折格子により単色化した光を、紫外光透過型グラントムソンプリズム³ を通して直線偏光を生成する。グラントムソンプリズムのサイズは光の入射する面が 10×10mm で長さが 20mm、材質は光学用方解石、消光比は 1×10^{-4} である。入射光は合成石英ガラス窓⁴ を通して真空チェンバー内に導入されカソードに入射される。カソード入射時の光形は、長方形で、縦 8mm、横 1.5mm 程度 (波長 250nm 時) である。

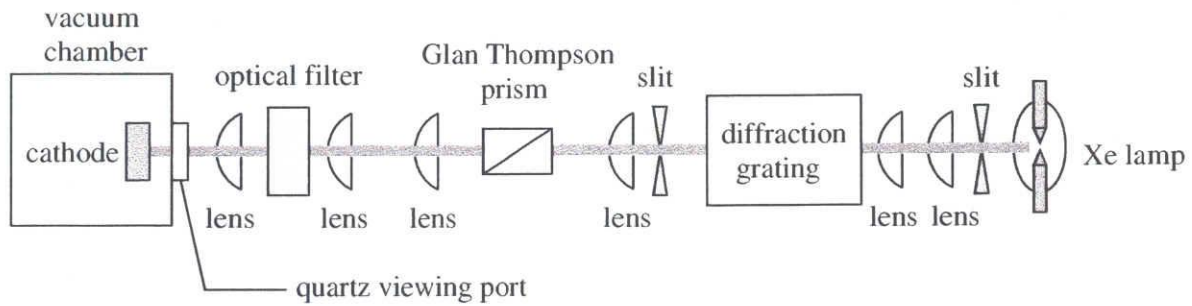


Figure 2.3: 光学系模式図

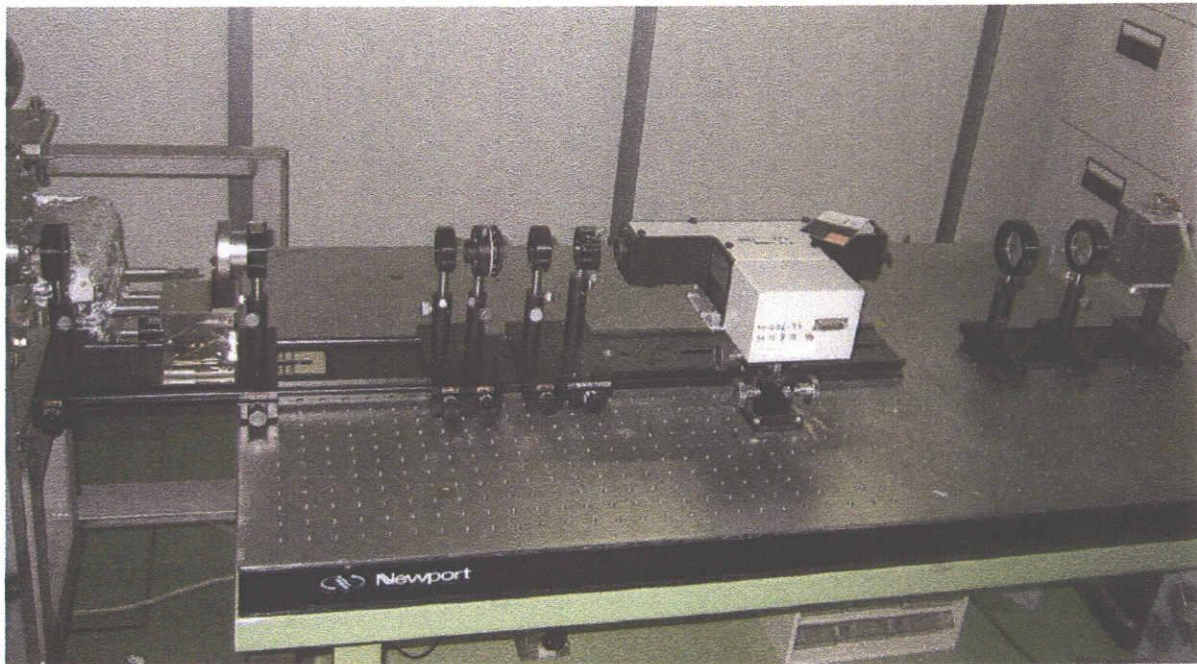


Figure 2.4: 光学系写真

³シグマ光機、UGTP-10-20-AN

⁴浜松ホトニクス(木戸工房)、VQ-070

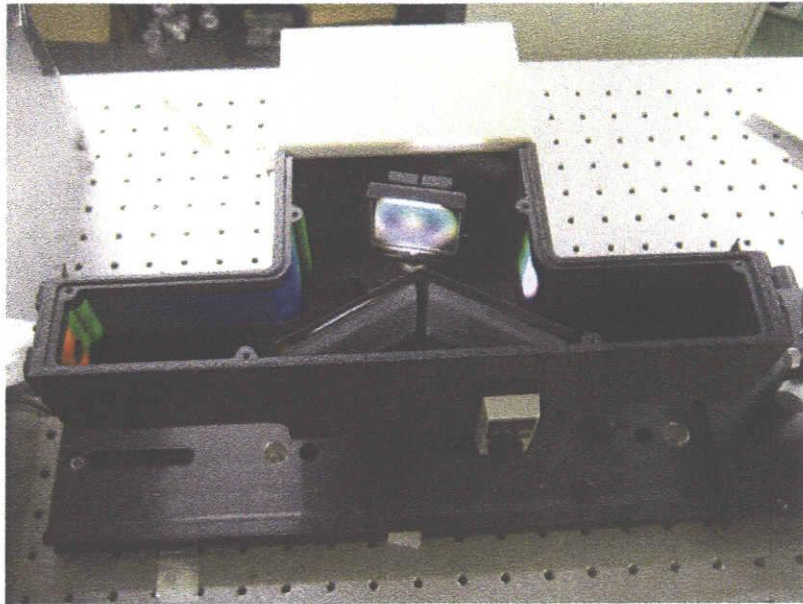


Figure 2.5: 分光器内部写真。画面向かって左側から入射した光が中央部にある回転式の回折格子で分光され、画面向かって右側へ出射される。写真は 250nm に合わせたとき。



Figure 2.6: 測定中の実験装置全体写真。測定中は電磁シールドやランプシェードをしている。

2.3 光の斜め入射

カソード部分はセラミック管を使い真空チェンバーと絶縁されている。カソードはシャフトによって回転導入器につながっており水平方向に回転させることができる。カソード基板を回転することで入射光の入射角度を任意に選ぶことができ、量子効率測定において直線偏光した入射光の入射角度依存性測定が可能である。回転導入器の分解能は、測定系全体で 5° 以下である。カソード基板は $50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 1\text{mm}$ の正方形の金属板を使用している。作製したセシウムテルライド薄膜は直径 50mm 程度の円形であり、光の形状を考慮すると測定可能角度は直入射を 0° と取ったとき約 88° までである。

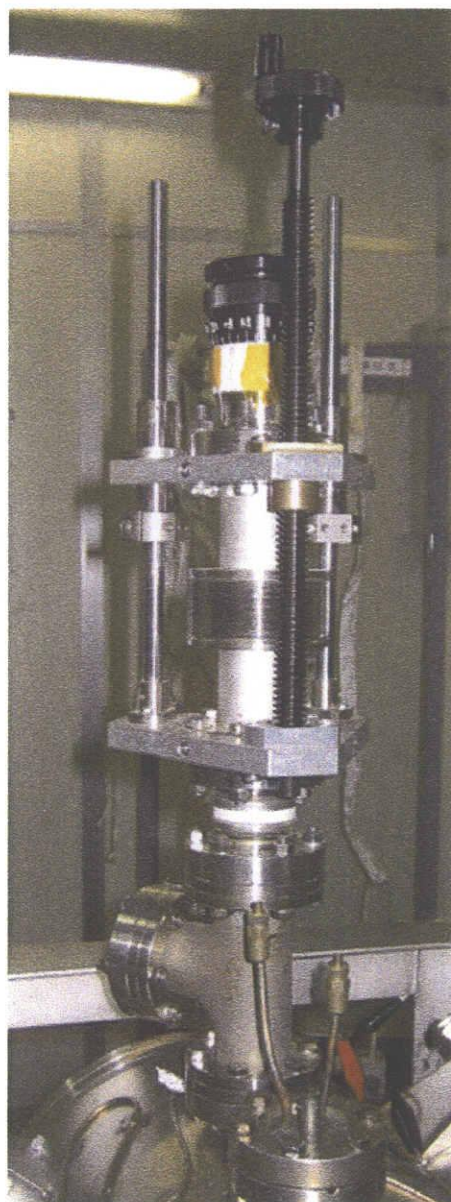


Figure 2.7: カソード回転導入部、カソード部直線導入部、カソード絶縁部写真

Chapter 3

セシウムテルライド 薄膜の作製と量子効率測定

3.1 セシウムテルライド 薄膜の作製

セシウムテルライド 薄膜を作製する基板には市販の研究用金属板を使用している。基板金属はエタノールによる超音波洗浄を行い清浄化し、真空チェンバー内に装着する。超高真空生成後、基板表面の清浄化のため 600°C の加熱処理を行う。基板加熱には、セラミックにより基板と絶縁したタンタル電熱線を使用している。

セシウムテルライド 薄膜の作製は基板の加熱処理後、基板温度を室温まで戻してからテルル、セシウムの順に蒸着する。直線導入器によってカソード基板は鉛直方向に、蒸着源は水平方向に移動させることができる。セシウムテルライド 薄膜の作製時は基板部分と蒸着源、水晶膜厚計センサー¹との位置を調節する。

3.1.1 テルル蒸着

テルルはタンゲステン電熱線バスケット内のテルル小片²(99.9999%) を熱し蒸散させる。これをテルル蒸着源としている。タンゲステン電熱線バスケットは 24mm×20mm のステンレスボックス内に固定されている。テルル蒸着源はカソードと水晶膜厚計センサーの中間に位置し、カソード側、水晶膜厚計センサー側に共に直径 11mm の穴があり、穴からテルルを蒸散させる。基板に蒸着したテルルの膜厚は蒸着中水晶膜厚計でモニタしている。膜厚計の分解能は約 0.01nm である。水晶膜厚計センサーは膜厚測定安定化のため、水冷により 20°C に保っている。タンゲステン電熱線に供給する電流での、テルル蒸着源の温度制御が困難になるのを防ぐためと、蒸着したテルル膜厚の不均一性を減らすため、テルル蒸着速度は 0.02nm/sec 以下に保っている。

¹ULVAC、CRTS-4U (ベークブルセンサー)、CRTM-5000(コントローラ)

²ニラコ、TE-950110

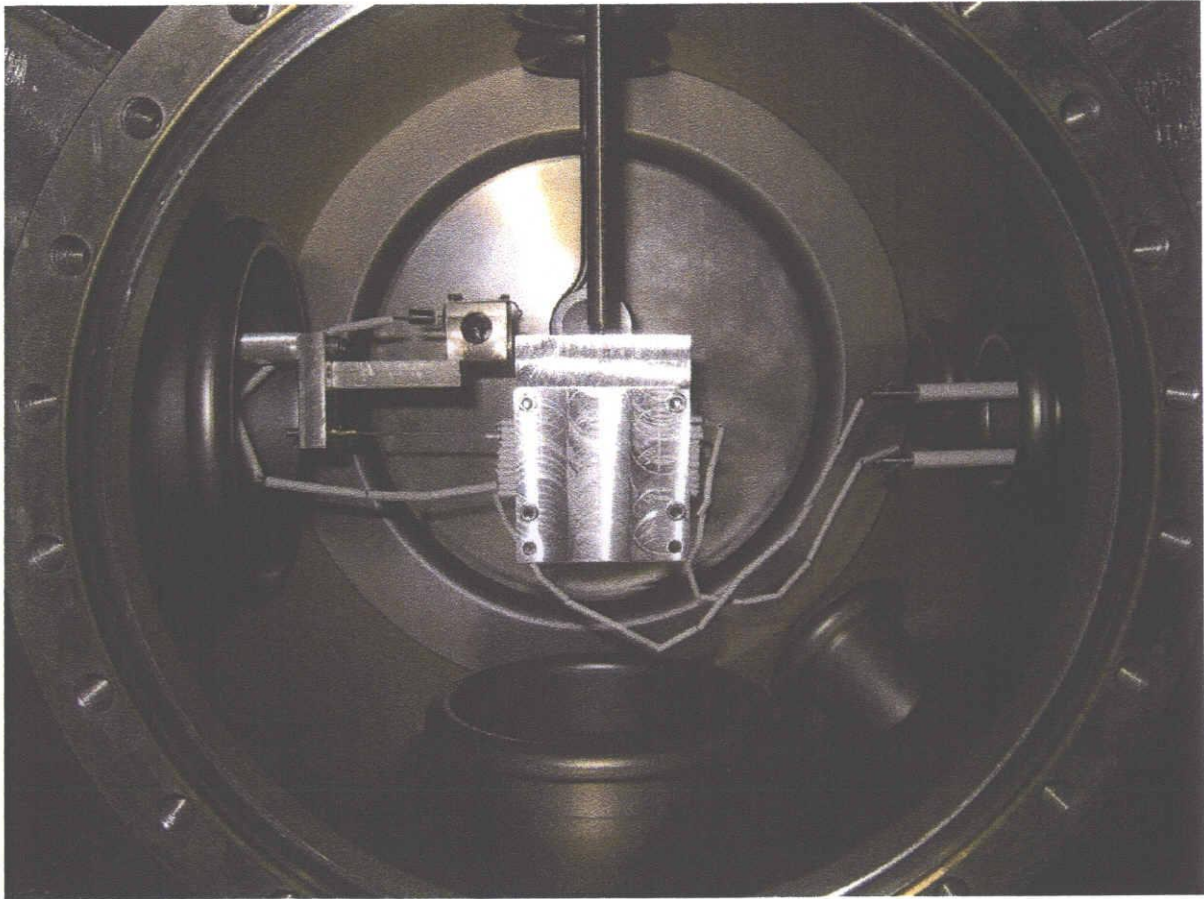


Figure 3.1: チェンバー内部写真。写真中央部にカソードホルダーが見える。カソードホルダーの左側にテルルとセシウムの蒸着源がある。カソードの向こう側にあるのは水晶膜厚計センサー。画面右側からカソード加熱用の絶縁されたタンタル電熱線がのびている。カソードは垂直方向に、蒸着源は水平方向に動かすことができる。

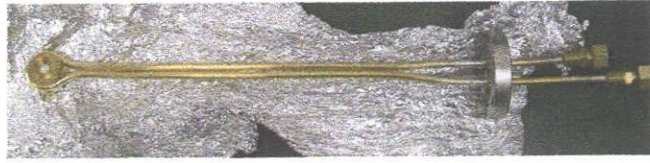


Figure 3.2: 水晶膜厚計センサー写真

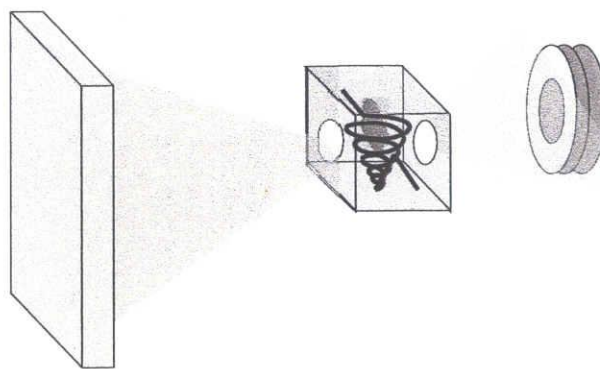


Figure 3.3: テルル蒸着イメージ図

3.1.2 テルル膜厚測定のカリブレーション

水晶膜厚計で測定する膜厚のカリブレーションのため、真空チェンバー内でガラス基板にテルルを蒸着した膜厚の異なる複数のサンプルを用意し、大気に取り出し干渉膜厚計で膜厚測定を行った³。干渉膜厚計の光源波長はおよそ 600nm、分解能は半波長の 1/10 の 30nm である。サンプルの写真を図 3.4 に示す。サンプル上の 9 箇所を測定した。

テルル蒸着源は基板と水晶膜厚計センサーの間に位置している。テルル蒸着源から、基板と水晶膜厚計センサーとの距離が等距離 (23mm) であるサンプルと、テルル蒸着源と基板の距離が 33mm、テルル蒸着源と水晶膜厚計センサーの距離が 12mm であるサンプルの測定結果を図 3.6 に示す。テルル蒸着源が基板に近く、さらにタングステン電熱線バスケットが露出しているために、テルル蒸着源と基板の距離が 23mm であるサンプルでは 100% 以上の不均一性が見られた。これは今後改善しなければならない点である。今の装置で可能な、テルル蒸着源と基板間の最大の距離は 33mm である。テルル蒸着源とサンプル間の距離を 33mm とした場合でも、最大でおよそ 45% 程度の不均一がある。しかし、実際に光が照射されるのは薄膜サンプルの中央部分だけであり、量子効率の測定に影響する部分はサンプルの全体ではない。図 3.7 に干渉膜厚計で測定したサンプル中央部の結果を示す。図 3.7 に示したサンプルは全てテルル蒸着源と基板の距離が 33mm である。横軸に水晶膜厚計で測定した値、縦軸が干渉膜厚計の値である。水晶膜厚計で測定される膜厚は実際に基板につまれた膜厚の約 3.2 倍である。テルル蒸着源と基板の距離が 33mm である場合、水晶膜厚計で測定、表示される膜厚のノーマライズファクターは 1/3.2 となる。一方、等距離の場合は 1 である。この論文で示したデータでは、図 6.1 中のタングステンと銅の結果のみ、テルル蒸着源と基板の距離は等距離で、それ以外の全てのデータでテルル蒸着源と基板の距離が 33mm のときのデータである。

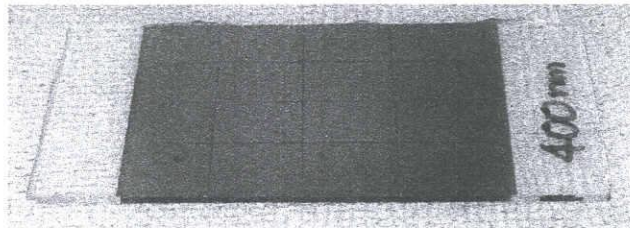


Figure 3.4: テルル膜厚測定カリブレーションサンプル写真。ガラス板上にテルルを蒸着したもの。干渉膜厚計による膜厚測定のために、縦に 3 つ横に 3 つガラス板まで傷を入れテルルをはがしている。測定箇所は傷の交差する部分。写真は水晶膜厚計で 400nm、干渉膜厚計で 120nm と測定したサンプル。

³テルル膜厚のカリブレーションは名古屋大学全学技術センターの五藤俊明氏にご協力頂きました。

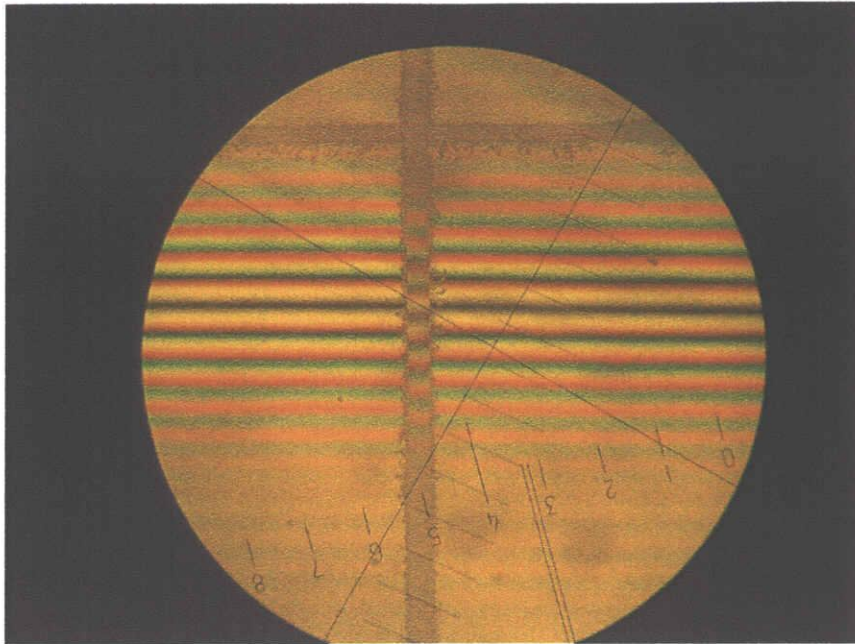


Figure 3.5: 干渉膜厚計写真。図 3.4 の中央部の測定。膜厚 120nm と測定したサンプル。干渉縞中央部の黒い線が測定対象の干渉縞。傷が交差している付近を測定した。

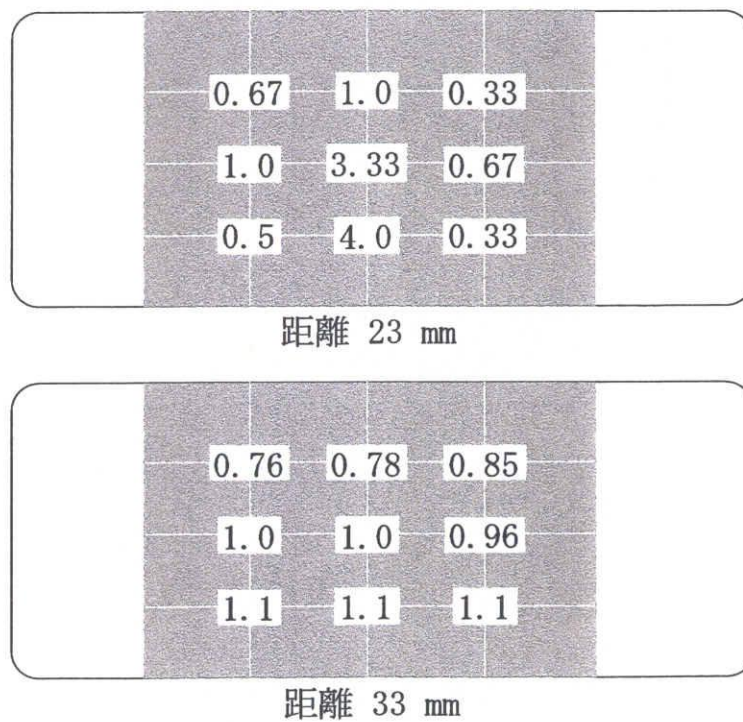


Figure 3.6: テルル膜厚測定の結果。数字は半波長の個数。上図は基板とテルル蒸着源の距離が 23mm のときのサンプル。下図は基板とテルル蒸着源の距離が 33mm。

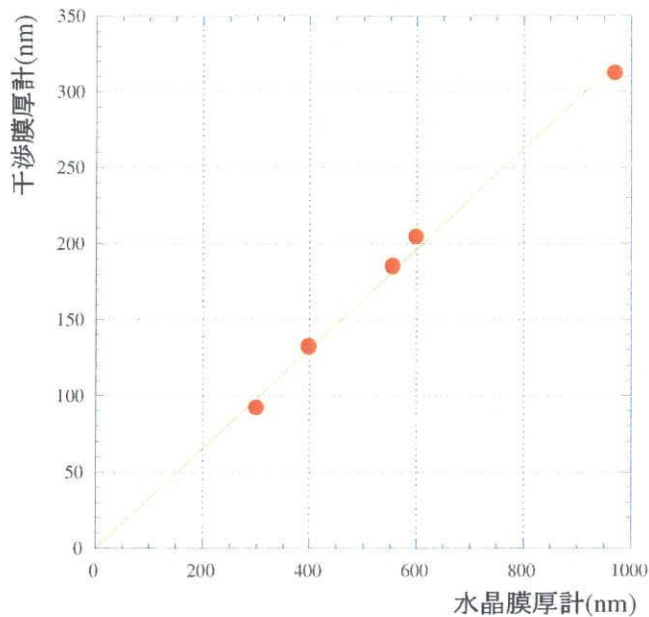


Figure 3.7: テルル膜厚測定のキャリブレーション。サンプル中央部のプロット。テルル蒸着源と基板の距離は 33mm。

3.1.3 セシウム蒸着

セシウムの蒸着には市販のクロム化酸化物 (CsCrO_4) 蒸着源⁴ を使用している。熱することによる還元反応を利用したものである。セシウムの蒸着中はカソードへ-100V 印加し紫外光を入射しているため、セシウム蒸着中の光電流値を測定できる。セシウムの蒸着効率を上げるため、基板から 20mm の位置にセシウム蒸着源を近接させている。セシウム蒸着源への供給電流値が 4.5A のとき蒸着源温度は 550°C 程度、5.5A のとき 650°C 程度である。セシウムの放出速度は、蒸着源温度が 550°C で 10^{-8} g/sec 程度、650°C で 10^{-7} g/sec 程度である (図 3.9)。繰り返し使うことで蒸着源からのセシウム放出量は徐々に減少する。目安となるセシウム蒸着中の真空度は、供給電流が 4.5A のとき 2×10^{-9} Torr 程度まで、5.5A のとき 2×10^{-8} Torr 程度まで悪化する。セシウムの蒸着中、セシウム蒸着源からの放射熱によって基板温度の上昇が予想できるが、本研究では基板温度は測定していない。

3.1.4 セシウム蒸着とセシウムテルライド 薄膜作製過程

セシウムテルライド 薄膜の作製において、セシウムの蒸着量は量子効率や寿命に大きく影響する。寿命とは、電子引き出しを続けるにつれ量子効率が悪くなることを指したものである。または電子引き出しを行わなくても、表面の劣化などにより経時的に量子効率が悪くなることを指している。本研究ではセシウムテルライド 薄膜の作製において、基板にまずテルルを蒸着した後にセシウムを蒸着する方法を取っている。テルルの蒸着量は、水晶膜厚計で測定し把握している。しかしセシウムの蒸着量は水晶膜厚計では測定できな

⁴saes getters, CS/NF/3.2 WIRE

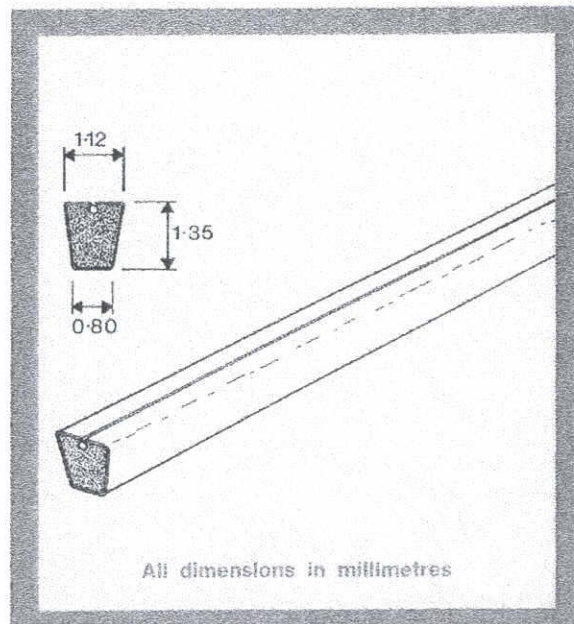


Figure 3.8: セシウム蒸着源。saes getters 資料より転載。

い。したがってセシウムの蒸着量については経験則に頼らざるを得ない。セシウムテルライド薄膜の量子効率を高く長時間安定に保つためには、セシウムテルライド薄膜作製時セシウムの蒸着量を制御しなければならない。系統的にセシウムテルライド薄膜の量子効率の安定性と、セシウムの蒸着条件には以下5点の関係がある。

1. セシウムの蒸着開始後から、セシウムテルライド薄膜からの光電流値はセシウムの蒸着量とともに上昇し、光電流値の上昇はある時点で最大値をとる。光電流最大値でセシウムの蒸着を停止すると、蒸着停止から約2時間後に安定し、光電流値を長時間安定に保つことができる (図 3.10(a)(b))。
2. 光電流最大値以降も続けてセシウムを過剰に蒸着すると、光電流値はセシウムの蒸着量とともに低下する。セシウムを過剰に蒸着しても、蒸着を停止した後、光電流値は次第に上昇し回復する。回復後は1と同様に光電流値を長時間安定に保つことができる (図 3.10(a)(b))。
3. 光電流最大値より前にセシウムの蒸着を停止すると短時間で光電流値は減少し寿命が短いセシウムテルライド薄膜ができる。このとき電子引き出しを行わなくても経時変化は大きく不安定である。
4. 光電流値が最大値に達するまでのセシウムの蒸着量は、テルル膜厚が大きいほど大きくなる。
5. セシウム蒸着において、セシウムの放出速度が大きいほど、光電流値が最大値に達するまでの時間は早い。

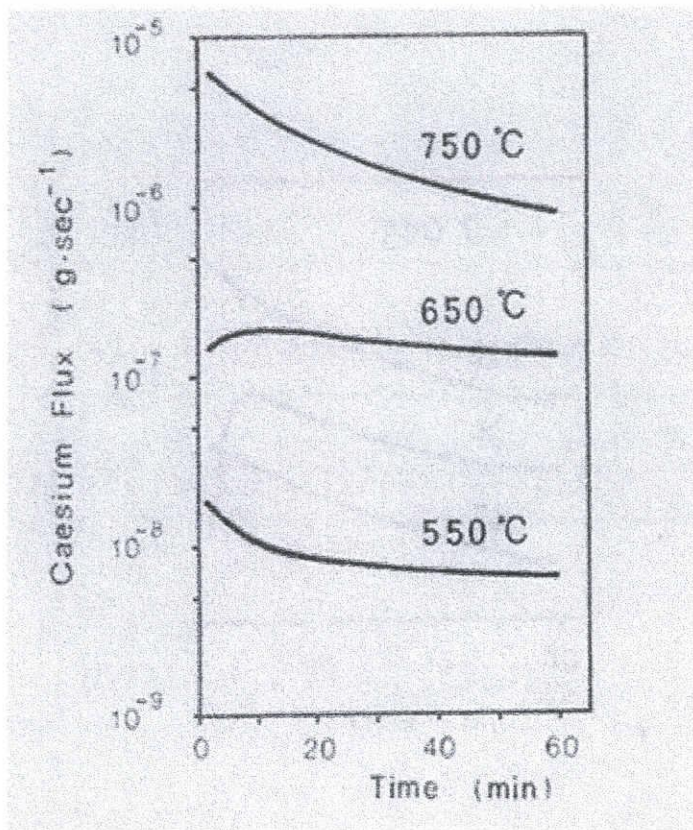
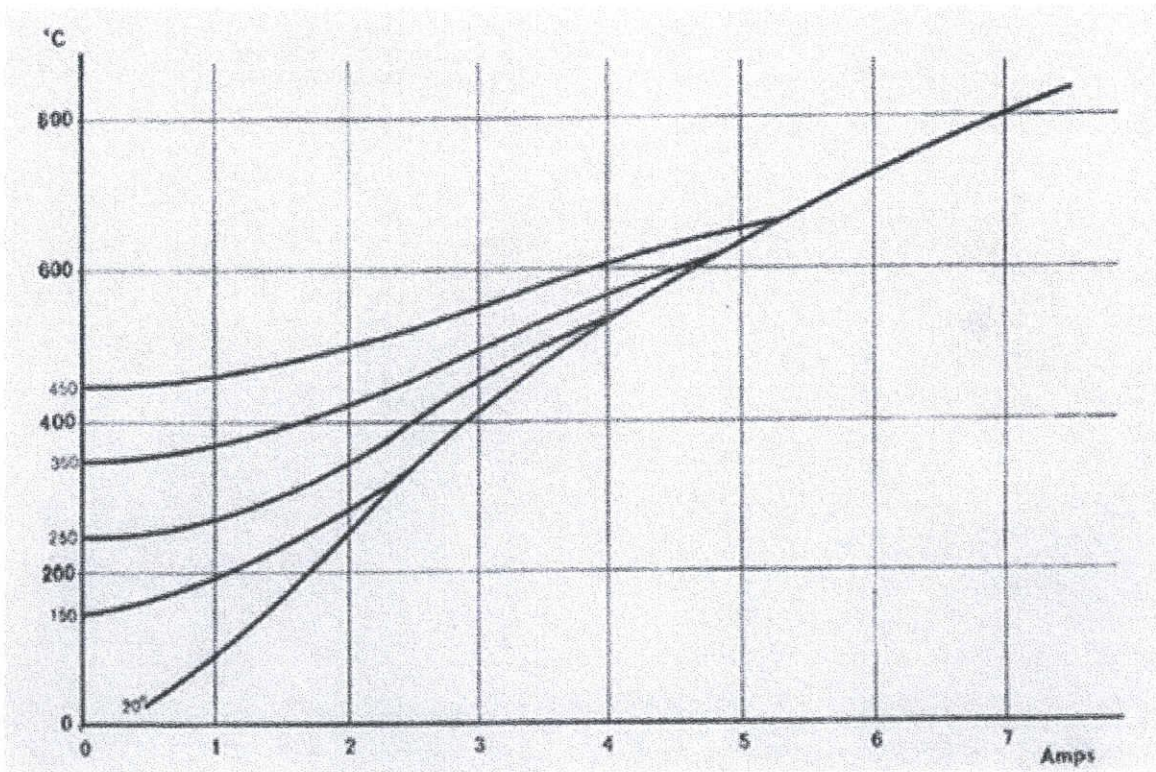


Figure 3.9: セシウム蒸着源の特性。saes getters 資料より転載。

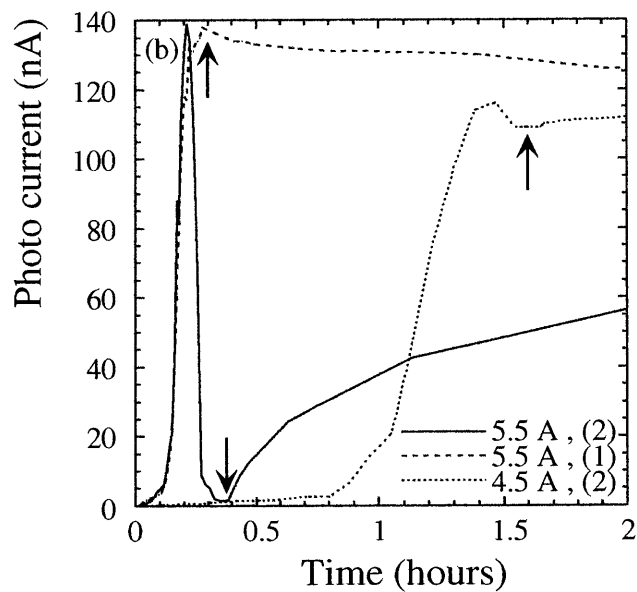
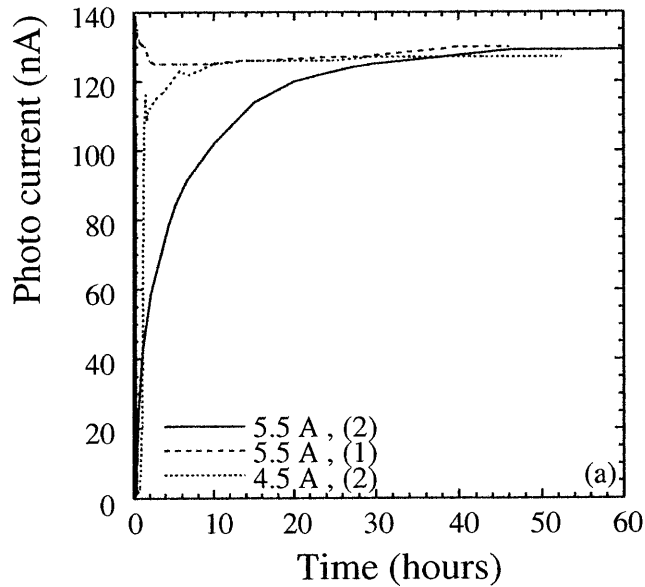


Figure 3.10: セシウムの蒸着条件と光電流値の時間経過。全てのサンプルでテルル膜厚は 10nm である。(a)、セシウム蒸着中とセシウム蒸着停止後の光電流値の経過。入射光波長は 250nm。セシウム蒸着の条件として、光電流最大値で蒸着を停止したサンプル (1) と、光電流最大値以降もセシウム蒸着を続けた過剰蒸着のサンプル (2) の光電流値の時間経過。セシウム蒸着源に供給する蒸着電流は 5.5A と 4.5A。いずれの場合も光電流値はほぼ同じ値で飽和する。過剰に蒸着するセシウムの量が少ないほど、飽和値に達する時間は短くなる。(b)、グラフ (a) の横軸 2 時間までを拡大したもの。セシウムの蒸着停止点をそれぞれ矢印で示した。

3.2 量子効率の測定

量子効率 Q は、

$$Q = n_e/n_p$$

で定義される。ここで n_e は単位時間当たりの放出電子数、 n_p は単位時間当たりの入射光子数である。放出電子数 n_e は、

$$n_e = I/e$$

で表される。 e は電子の素電荷である。 I は測定した光電流値である。光電流値測定は、真空チェンバーからセラミック管によって絶縁したカソード基板に-100Vを印加し、接地した真空チェンバーとカソード基板の間の電流を測定している。本研究で使用した光電流値測定用の電流計⁵の分解能は30fAである。カソードに印加する-100Vと等電位になる部分が空気中にも露出しているため、そのままではアンテナ効果の影響で、正確な電流値を測定することはできない。そのため装置全体をアルミの筒で被い、電磁シールドを行っている(図2.6)。絶縁のためのセラミック管部分も空気中に露出しているため、実験室の湿度により絶縁電流が変化するが、測定系全体での光電流値測定の分解能は1pA程度である。

入射光子数 n_p は、分光したランプの光強度をシリコンフォトダイオード⁶で測定した光の強度より算出している。光の強度 P は、 $P = V_p/R S$ で表される。 V_p はフォトダイオードの出力電圧、 S はフォトダイオードの受光感度、 R はフォトダイオードの読みだし抵抗である。用いたシリコンフォトダイオードの有感波長領域は190nmから1100nmであり、受光感度は紫外光領域で100mA/W以上である(図3.11)。受光感度には系統的に10%程度の誤差が含まれている。入射光子数 n_p は、

$$n_p = Pf\lambda/hc$$

で表される。 f は合成石英ガラス窓の透過率(図3.11)、 λ は入射光波長、 h はプランク定数、 c は光速である。よって量子効率は

$$Q = n_e/n_p = \frac{Ihc}{Pf\lambda e}$$

となる。

紫外光は大気による吸収を受け減衰する。光強度の測定位置から、合成石英ガラス窓まで約10cmの距離があり、光は測定位置から、さらに10cm分の大気を通過する。そのため測定した光強度は大気による紫外光の吸収を考慮すると正しくない。しかし本実験では大気による光の吸収は湿度に影響され年間を通じて正しく補正することが困難であり、また光が通過する大気の厚さが10cmと小さいことから無視している。

⁵東亜電波工業、デジタル絶縁計 DSM-8103

⁶浜松ホトニクス、S6337-01、受光部 18.0 × 18.0mm、カバーなし

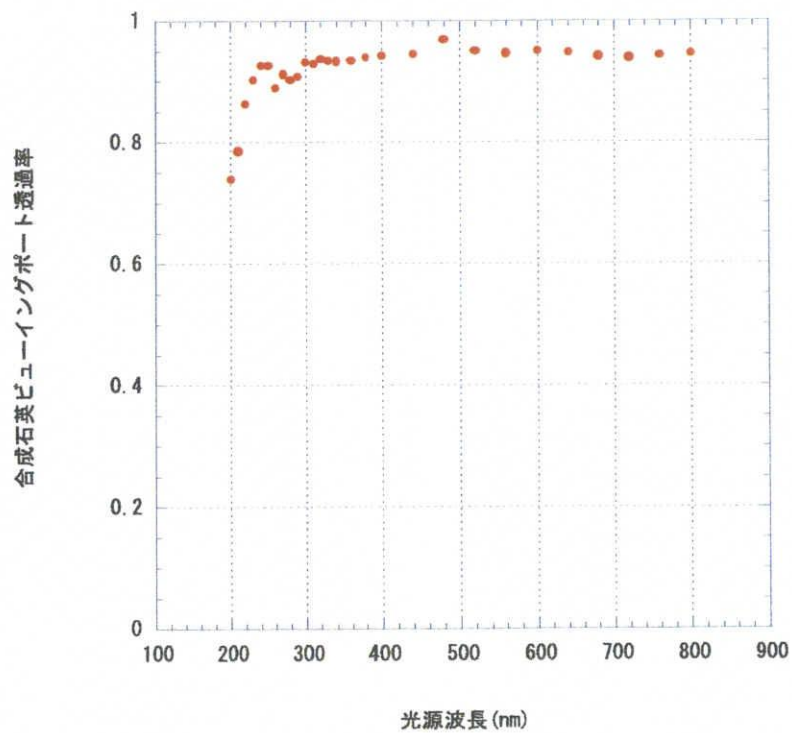
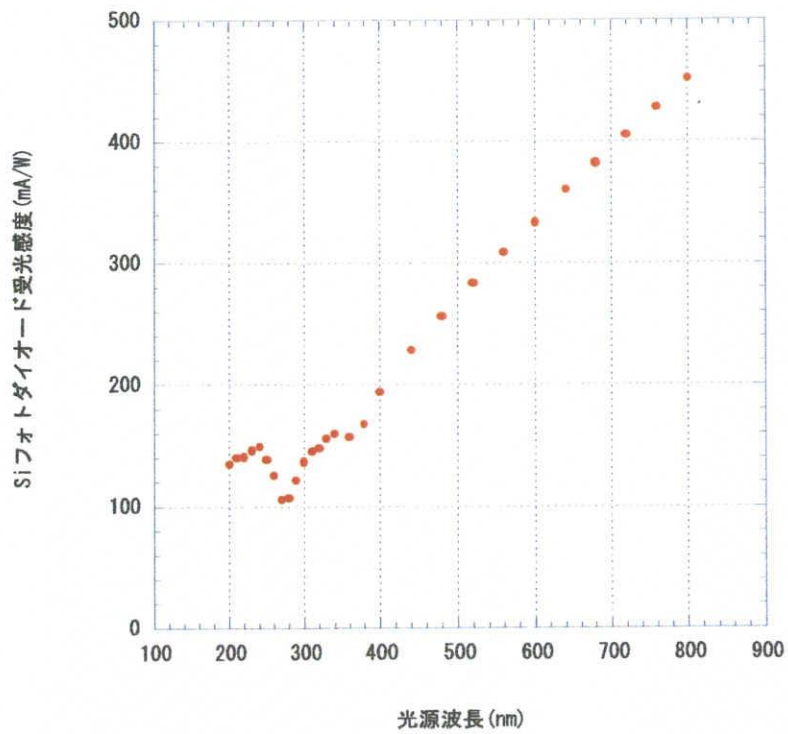


Figure 3.11: 本実験で用いたシリコンフォトダイオードの受光感度と合成石英ガラス窓の透過率の測定結果

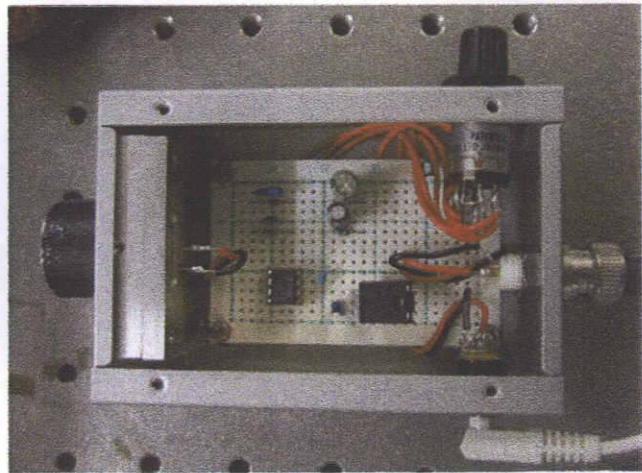
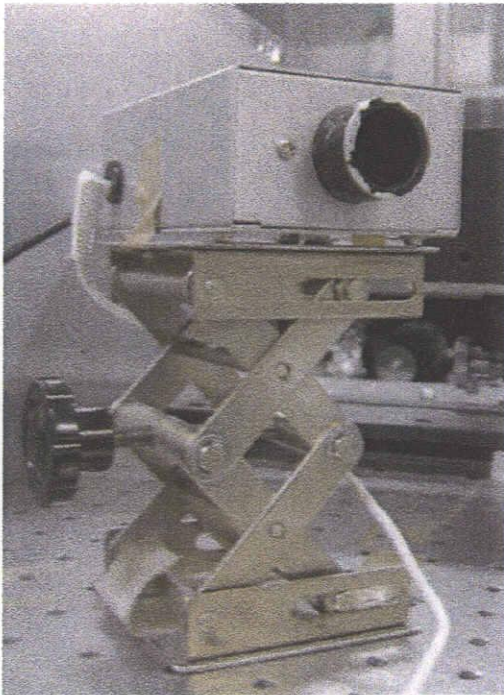


Figure 3.12: 光強度計写真。製作には名古屋大学大学院理学研究科、山本 将博氏にご協力頂いた。

3.3 量子効率の入射光エネルギー（波長）依存性

セシウムテルライド薄膜フォトカソードの量子効率は、薄膜の蒸着条件により微妙に変化する。テルル、セシウムの蒸着条件、その蒸着誤差や作製中の装置の真空度、基板の温度などの変化は量子効率の変化や不安定性につながる。

ここでは図 3.13 に蒸着条件として、テルルの膜厚の違い、セシウムの蒸着条件の違いについて量子効率の入射光エネルギー依存性を示す。図 3.13 に示すデータは入射光は入射角度が 0° で、グラントムソンプリズムは通していないほぼ無偏光の状態である。

図 3.13(a) では、テルル膜厚が 5nm、10nm、15nm についての量子効率の入射光エネルギー依存性の測定結果を示した。このときのセシウムの蒸着条件はいずれも蒸着電流が 5.5A であり、過剰蒸着の状態まで蒸着した。成膜後 40 時間以上経過したときの量子効率である。入射光エネルギー 5eV(波長 250nm) での量子効率はテルル膜厚が 5nm のとき 0.176、10nm のとき 0.193、15nm のとき 0.177 で、テルル膜厚が 10nm の時が量子効率は最も高い。4eV 以上の領域では大きな変化はないが、4eV 以下の領域ではテルル膜厚が薄いほど量子効率は高い。比較として Powell らのデータ [15] を実線で示した。

図 3.13(b) ではセシウムの蒸着条件の違いを示す。セシウム蒸着源に供給する蒸着電流は 5.5A、セシウム蒸着を光電流最大値で停止したもの (1) と過剰蒸着したもの (2) の比較である。テルル膜厚はいずれも 10nm である。セシウム蒸着停止後約 50 時間経過しているときの量子効率である。入射光エネルギー 5eV(波長 250nm) での量子効率はセシウムの蒸着電流 5.5A、蒸着方法 (1) のとき 0.182、蒸着電流 5.5A、蒸着方法 (2) のとき 0.193 である。セシウムの蒸着条件 (1) と (2) において、量子効率は入射光エネルギー 5eV 近傍では著しい違いはない。それに対して、入射光エネルギー 4eV 以下の領域ではセシウムの蒸着条件によって大きな変化が見られる。

3.3.1 蒸着条件による量子効率入射光エネルギー依存性の変化

図 3.14 にセシウムテルライドの相図を示す [16]。セシウムとテルルの化合物は作製温度によって様々な組成比をとる。本研究では作製中の基板温度は室温であると推定されるが、直接測定しておらず、作製した薄膜の組成も不明である。

図 3.13(b) に示した 2 つのサンプルはセシウムの蒸着条件が異なり、量子効率の入射光エネルギー依存性が異なる。蒸着条件の違いから組成比や構造が異なる薄膜が生成された可能性がある。

Powell らのセシウムテルライド薄膜の組成は Cs_2Te であるが、その光電子分光の結果によるとエネルギーギャップ $E_G=3.3\text{eV}$ 、電子親和性 $E_A=0.2\text{eV}$ であり、閾値エネルギー $E_T=3.5\text{eV}$ である。 E_T は量子効率の入射光エネルギー依存性曲線上の肩として現れるとされている [15]。

図 3.13 に示した領域には肩が 2 つ存在する。エネルギーが高い方の肩は閾値エネルギーの肩として説明できる。実験結果図 3.13(b) に示したセシウムの蒸着条件が異なるサンプルの閾値エネルギーの変化は 0.5eV 程度である。セシウムの蒸着量が少ないと予想されるサンプルで閾値エネルギーは低い方へシフトしており、様々な組成比をもつセシウム

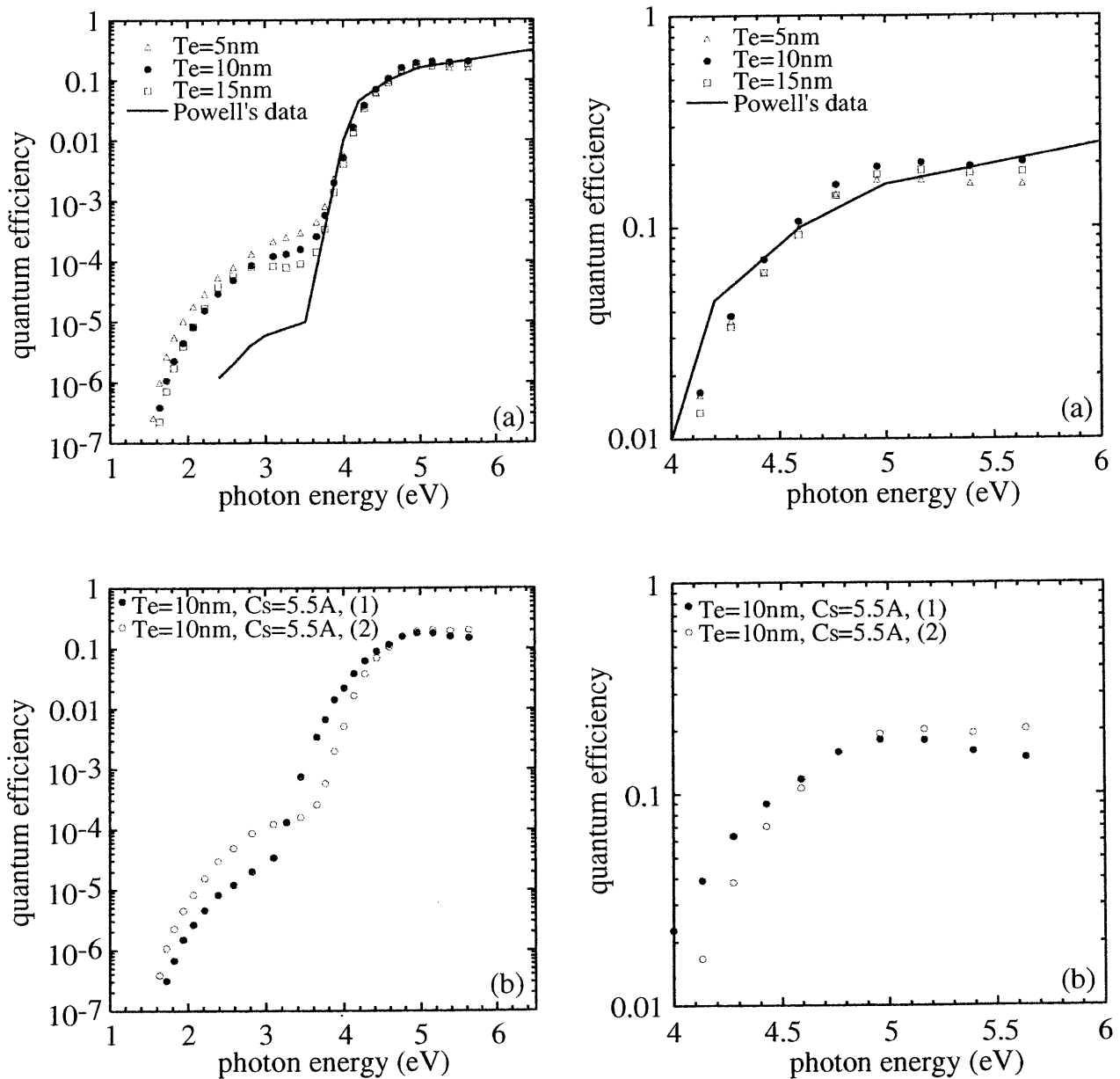


Figure 3.13: セシウムテルライド薄膜の量子効率の入射光エネルギー依存性。蒸着条件の違いと量子効率の変化。縦軸量子効率、横軸入射光エネルギー。(a)、テルルの膜厚 5nm, 10nm, 15nm の比較。参考のため実線で Powell らのデータ [15] を示した。(b)、セシウムの蒸着条件の比較。セシウムの蒸着方法で、光電流最大値でセシウム蒸着を停止したサンプル (1) と、過剰蒸着したサンプル (2) の量子効率。セシウム蒸着源に供給する蒸着電流はいずれも 5.5A。

テルライドの組成比や、未知である構造の変化によるものと予想される。セシウムの蒸着条件として、過剰蒸着の方法を取ったサンプルでは Powell らのデータの閾値エネルギーとほぼ同じであることから、セシウムを過剰蒸着したサンプルの組成は Cs_2Te であると予想できる。我々は様々な組成比を取るセシウムテルライドの組成比と量子効率の関係を知らない。今後の研究が待たれる。

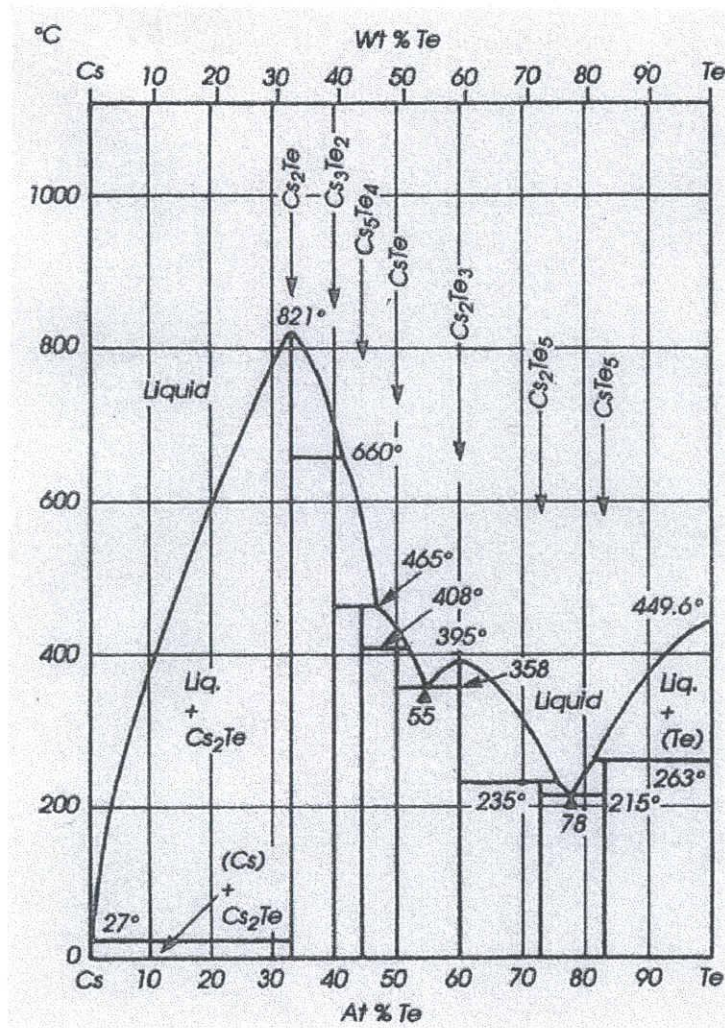


Figure 3.14: セシウムテルライド相図。[16] より転載。

3.4 セシウムテルライド 薄膜フォトカソードの寿命

この論文で示すセシウムテルライド薄膜フォトカソード実験の全ての結果は、カソードへの印加電圧-100V、入射光強度 $10\mu\text{W}$ 程度、放出電流値が紫外光領域で 100nA 程度の小出力でのものである。小出力テストではあるが、入射光エネルギー 4eV 以上、入射光波長 300nm 以上の紫外光領域での量子効率 10 日以上変化せず安定である (図 3.15)。作製したセシウムテルライド薄膜は真空の悪化に対しても安定で、 $2\times 10^{-10}\text{Torr}$ から $2\times 10^{-8}\text{Torr}$ 程度の 2 桁の真空度悪化に対して量子効率は変化しない。本研究のセシウムテルライド薄膜の作製方法では、作製からおよそ 40 時間後から 10 日以上、安定的に量子効率の測定を行うことができる。

しかし可視光領域では長時間安定とは言えない。入射光波長が 400nm のとき、作製後 200 時間程度で、量子効率が最大値の半分になる。

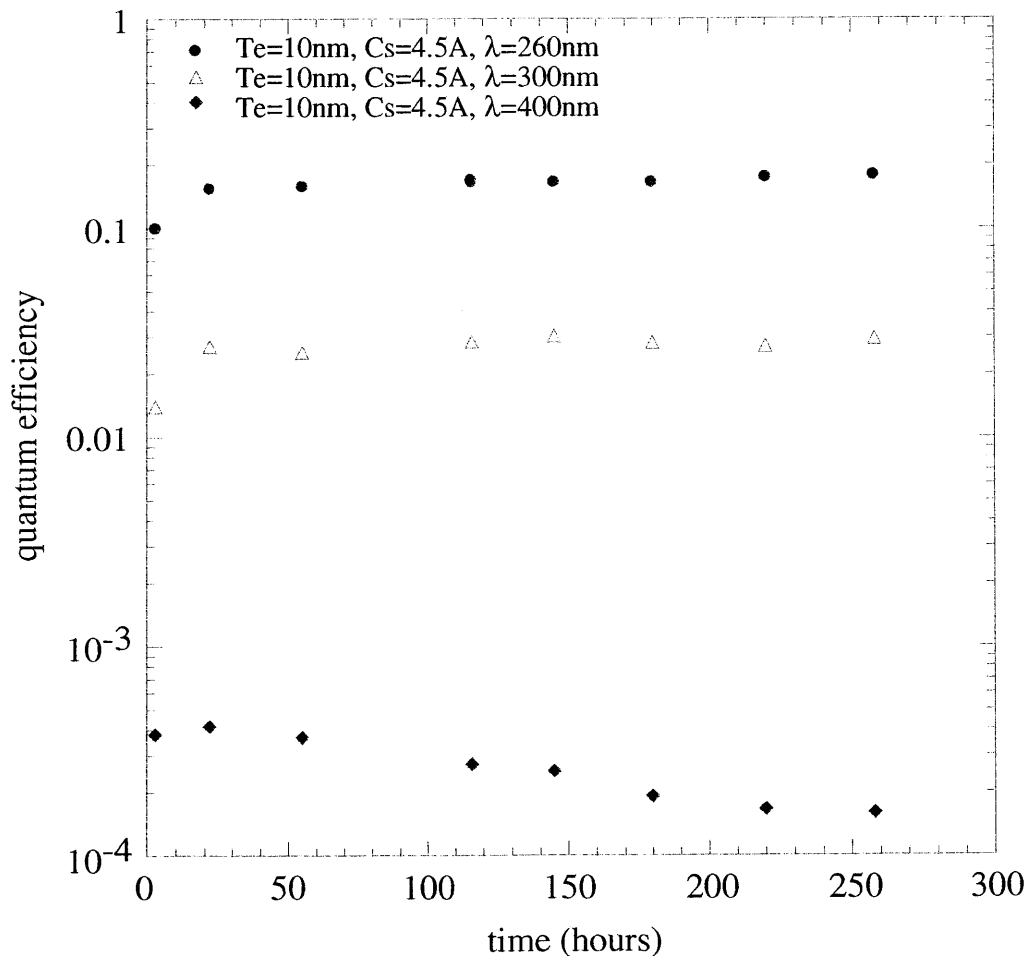


Figure 3.15: セシウムテルライド薄膜の量子効率の作製後の経過。入射光波長が 300nm 以下では 10 日以上安定でほとんど変化しない。入射光波長が 400nm では作製後 200 時間程度で、量子効率が最大値の半分になる。

Chapter 4

直線偏光を用いた量子効率の入射光角度依存性

フォトカソード 高周波電子銃の光源としては通常固体レーザーが使用される。固体レーザーはその発振原理により偏光している。レーザー光を入射する方法として、カソード表面に対してレーザー光を垂直に入射する直入射と、斜めから入射する斜入射がある。金属フォトカソードを使用する場合、量子効率の観点からは斜入射が有利であるとされている [17]。しかしながら、セシウムテルライド 薄膜フォトカソードの量子効率の入射光角度依存性については、系統的なデータは今までに報告されていない。

斜入射を採用した場合、カソード面にあたる光束の面積が拡大することと、カソード面に当たるタイミングに幅が生じることにより、エミッタンスと時間幅がともに増大するという不利がある。これを補正するための波面補正光学系が考案されており、紫外線領域においてもスポットサイズと時間幅を縮小して入射することが可能である。Tomizawara は紫外線レーザー光を用いた電子銃において $2\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (カソードは銅、電子エネルギー 3.1MeV、電子強度は 0.1nC/bunch) の電子ビームのエミッタンスを観測している [18]。

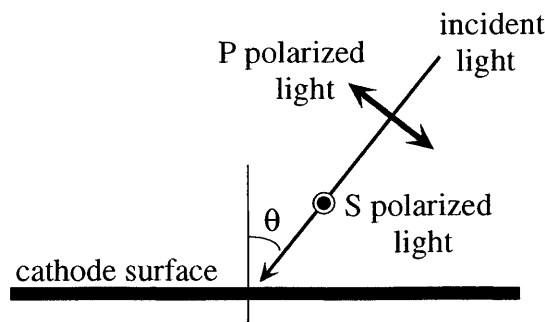


Figure 4.1: S、P 偏光

4.1 測定結果

図 4.2、4.3、4.4、4.5 に直線偏光した入射光を使ってセシウムテルライドの量子効率の入射光角度依存性を測定した結果を示す。入射光角度は正面入射 (直入射) のときを 0° とした。入射面に対して垂直方向の偏光状態を S 偏光、平行方向の偏光状態を P 偏光とした (図 4.1)。

図 4.2、4.3、4.4 に示すデータは、蒸着条件としてテルルの膜厚を変えたもので、テルルの膜厚は 10nm とその近傍として 5nm、15nm を選び測定した。セシウムテルライド薄膜作製のセシウムの蒸着条件は蒸着電流 5.5A、過剰蒸着である。入射光波長はそれぞれ 250nm、275nm、300nm である。

図 4.5 に示すデータは、蒸着条件としてセシウムの蒸着条件を変えたもので、それぞれセシウムの蒸着電流は 5.5A で、光電流最大値で蒸着を終了したサンプル (1) と過剰蒸着のサンプル (2) の入射光角度依存性である。入射光波長 250nm で、いずれもテルル膜厚は 10nm、セシウムの蒸着電流は 5.5A である。

測定結果からは 0° 以外の全ての入射角度で、P 偏光入射時の量子効率 (Q_p) は S 偏光入射時の量子効率 (Q_s) を上回り ($Q_p \geq Q_s$)、P 偏光入射時には量子効率は 60° から 70° にピークを持つ。P 偏光入射角度 60° の量子効率は、入射角度が 0° の量子効率に対して、10% から 20% 程度高い。この測定結果が示す通り、セシウムテルライド薄膜フォトカソードにおいても、量子効率の観点からは P 偏光斜入射を採用する方が有利であることが確認できた。

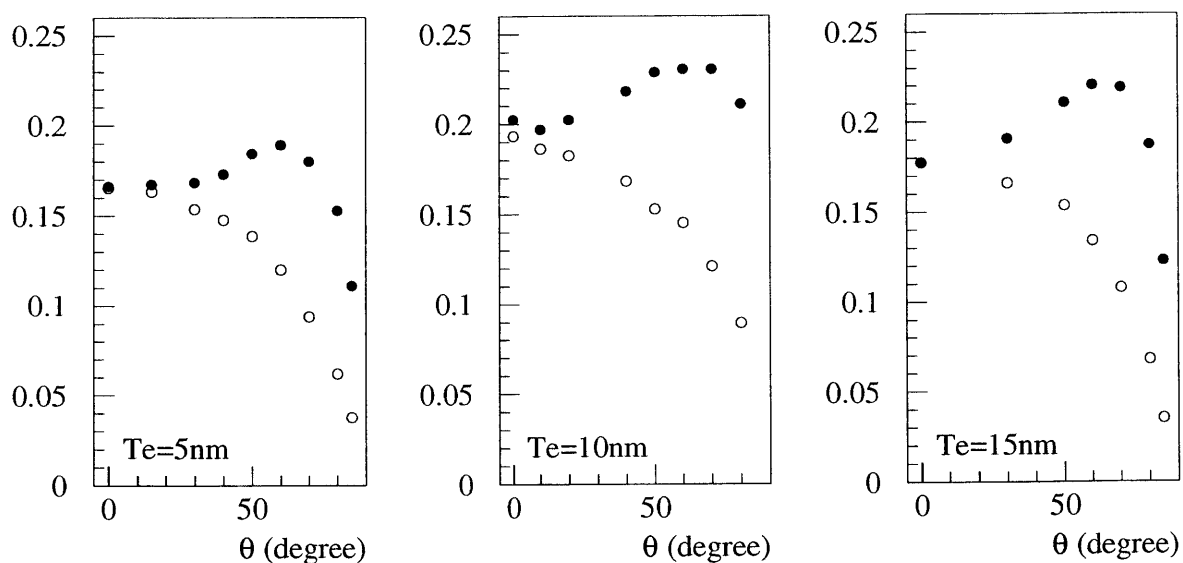


Figure 4.2: セシウムテルライド薄膜の量子効率入射光角度依存性。縦軸は量子効率、横軸は入射光角度である。入射光波長は 250nm。左からテルル膜厚 5nm、10nm、15nm。図 3.13(a) に示したものと同サンプル。それぞれ S、P 偏光 (○、●) の量子効率。

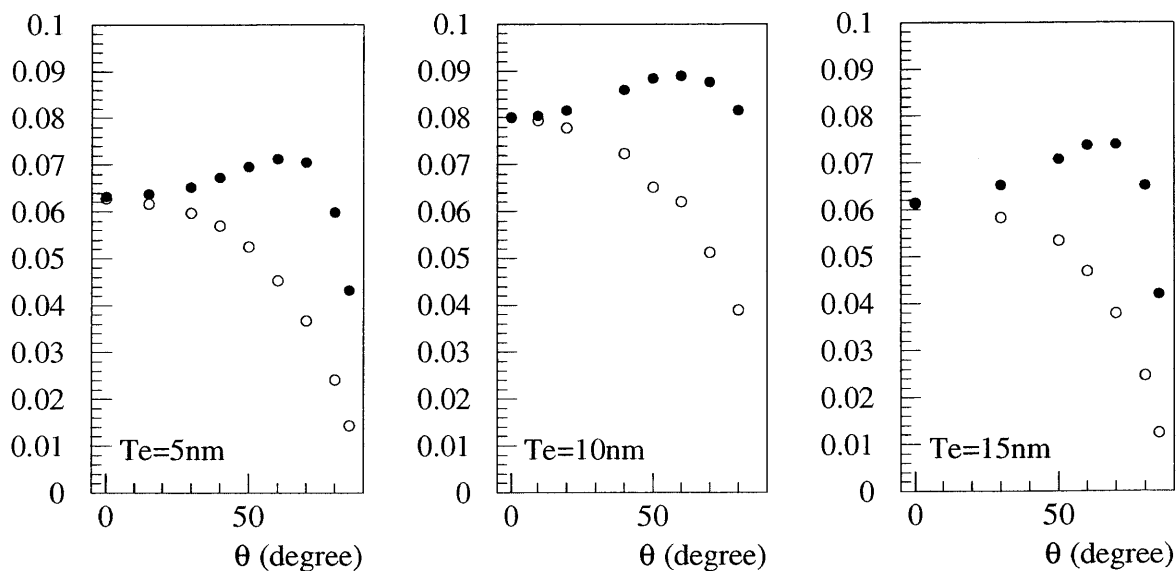


Figure 4.3: セシウムテルライド薄膜の量子効率入射光角度依存性。縦軸は量子効率、横軸は入射光角度である。入射光波長は 275nm。左からテルル膜厚 5nm、10nm、15nm。図 3.13(a) に示したものと同サンプル。それぞれ S、P 偏光 (○、●) の量子効率。

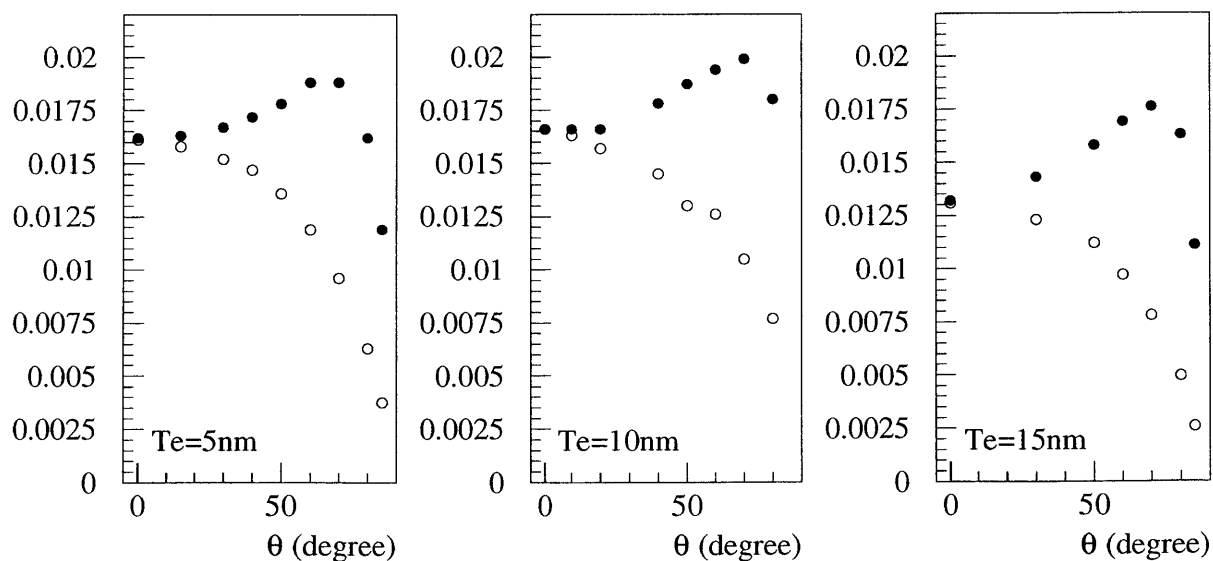


Figure 4.4: セシウムテルライド薄膜の量子効率入射光角度依存性。縦軸は量子効率、横軸は入射光角度である。入射光波長は 300nm。左からテルル膜厚 5nm、10nm、15nm。図 3.13(a) に示したものと同サンプル。それぞれ S、P 偏光 (○、●) の量子効率。

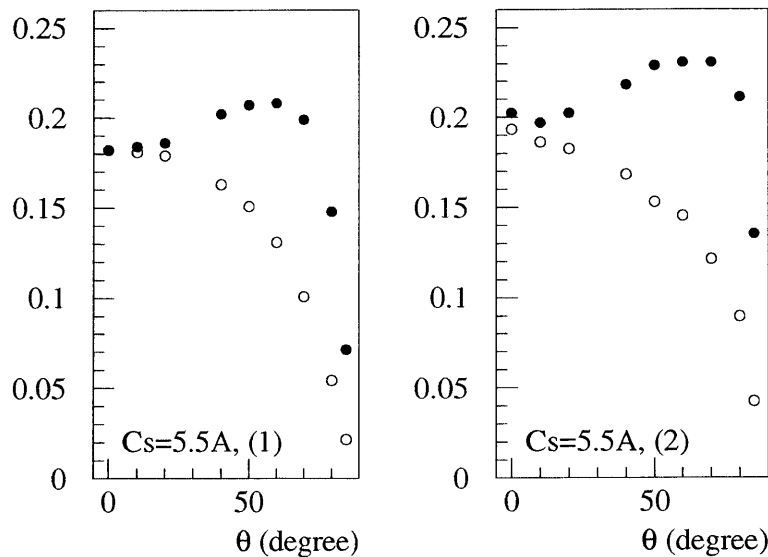


Figure 4.5: セシウムテルライド薄膜の量子効率入射光角度依存性。縦軸は量子効率、横軸は入射光角度である。入射光波長は 250nm。いずれもテルル膜厚は 10nm、セシウムの蒸着電流は 5.5A。光電流最大値でセシウム蒸着を終了したサンプル (1) と、セシウム過剰蒸着のサンプル (2)。図 3.13(b) に示したものと同サンプル。それぞれ S、P 偏光 (○、●) の量子効率。

基板として用いたモリブデン基板の表面粗さは平均で 70nm である¹。これは今回調べたセシウムテルライド薄膜の膜厚を超えるものであり、P 偏光斜入射の量子効率はこの表面粗さによってなまる方向に働くと予想される。それにもかかわらず、図 4.2、4.3、4.4、4.5 に示すように入射角度 60° から 70° で量子効率 (P 偏光) はピークをつくる。セシウムテルライド薄膜の膜厚よりも大きな表面粗さの基板を用いてもなお、直入射における量子効率よりも斜入射における量子効率の方が優位であることがわかる。

4.2 セシウムテルライド薄膜からの光電子放出の考察

本研究では半導体であるセシウムテルライド薄膜からの光電子放出 (量子効率) を扱っているが、半導体からの光電子放出は Spicer の 3 段階モデルで説明される [19]。

1. 光を吸収した価電子帯の電子が伝導帯へ励起され
2. 励起された電子が散乱されながら表面へ移動する
3. 表面に移動した電子が真空中に脱出する

¹基板サンプルの表面粗さ測定は名古屋大学大学院工学研究科、熱加工プロセス工学研究室 (篠田研) の桑野智氏にご協力頂きました。今後示す全ての基板の表面粗さは桑野氏のご協力によるものです。

この3つの過程で説明されるモデルである。半導体において光電効果を起こす閾値エネルギー (E_T) は、不純物を無視すると、エネルギーギャップ (E_G) と電子親和性 (E_A) によって

$$E_T = E_G + E_A$$

で表される。Powellらの光電子分光の結果によると $E_G=3.3\text{eV}$ 、 $E_A=0.2\text{eV}$ であり、 $E_T=3.5\text{eV}$ である。 E_A が 0.2eV と非常に小さく、これがセシウムテルライドが高い量子効率を持つことに寄与しているとされている [15]。

Powellらの光電子分光の結果から推察されるセシウムテルライドのバンド構造として Floettmann によって報告されているものを図 4.7 に示す [20]。

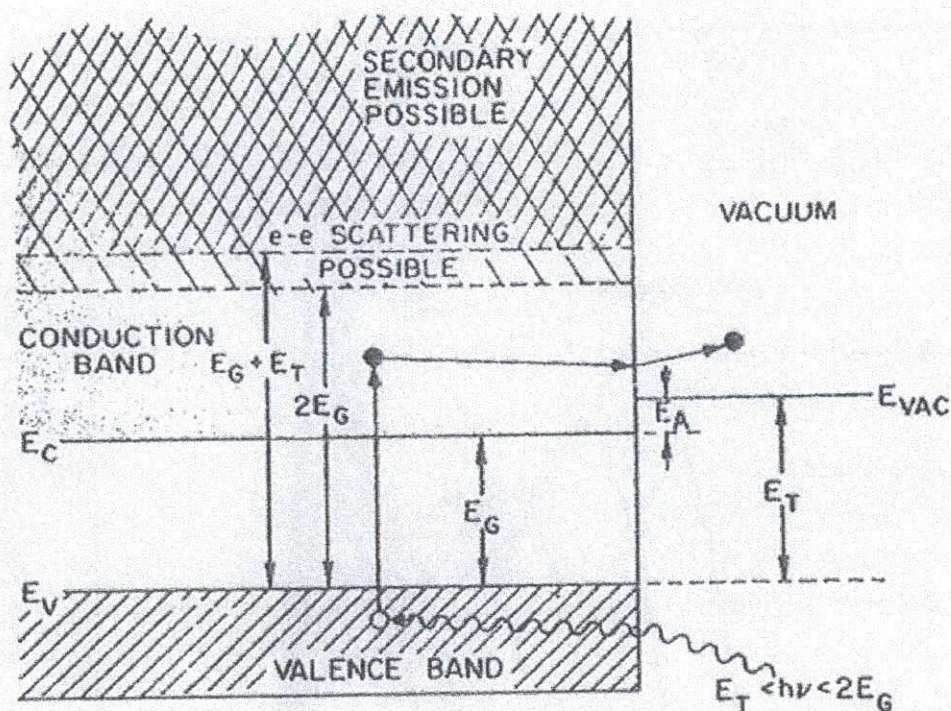


Figure 4.6: 半導体からの光電子放出 (3段階モデル)。[15] より転載。

入射光強度 I_0 、光子の吸収係数を α 、表面での光の反射率を R としたとき、深さ y での光の強度は

$$I(y) = I_0(1 - R)e^{-\alpha y}$$

で表される。電子が励起される過程において吸収される光の強度は $1 - R$ に比例するので、量子効率は $1 - R$ に比例することになる。一般に反射率は直線偏光した入射光の入射角度 (θ) に依存し、入射光が P 偏光時の反射率 (R_p) と S 偏光時の反射率 (R_s) は、入射角度が 0° 以外で異なった値を取る。

ここでは金属基板上に作製した単層セシウムテルライド薄膜からの光電子放出のモデルを考える。本研究のセシウムテルライド薄膜の膜厚は 10nm から 30nm 程度でありバルクであるとは考えられない [21][7]。つまり入射した光はセシウムテルライド薄膜で吸収さ

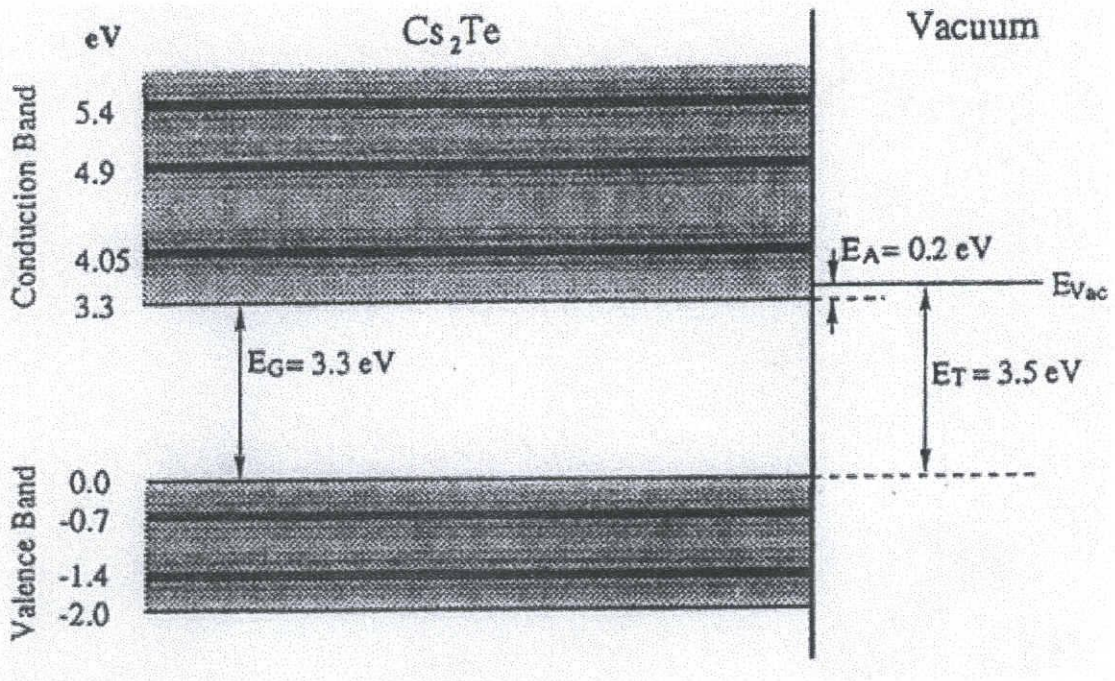


Figure 4.7: セシウムテルライドのバンド構造。セシウムテルライドの光電子分光の結果を示した Powell らの報告から、Floettmann が推察したもの。[20] より転載。

れきらず、残った光は基板であるモリブデンまで到達していると考えられる。基板まで到達した光は、薄膜と基板の界面で反射または透過し、反射光は再び薄膜中に入射される。したがって薄膜の反射率は入射光の干渉を考慮しなければならない。干渉を考慮した反射率は、それぞれ真空や薄膜、基板物質の光学定数 (n : 屈折率, k : 減衰係数) を与えた、薄膜に対するフレネルの反射公式 [22] で計算できる。複素屈折率が

$$\hat{n} = n + ik$$

のとき、 a 、 b を用いて

$$\hat{n}_y = a + ib ; a, b \geq 0$$

$$2a^2 = \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2\theta)^2 + 4n^2k^2} + (n^2 - k^2 - \sin^2\theta)$$

$$2b^2 = \sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2\theta)^2 + 4n^2k^2} - (n^2 - k^2 - \sin^2\theta)$$

とする。真空 (物質 2)、薄膜 (物質 1)、基板 (物質 0) に対する複素屈折率が \hat{n}_0 、 \hat{n}_1 、 \hat{n}_2 であるとき、 \hat{n}_y を \hat{n}_{0y} 、 \hat{n}_{1y} 、 \hat{n}_{2y} とする。

$$\hat{r}_s(1,2) = \frac{\hat{n}_{1y} - \hat{n}_{2y}}{\hat{n}_{1y} + \hat{n}_{2y}}, \quad \hat{t}_s(1,2) = \frac{2\hat{n}_{1y}}{\hat{n}_{1y} + \hat{n}_{2y}}$$

$$\hat{r}_p(1,2) = \frac{\hat{n}_2^2 \hat{n}_{1y} - \hat{n}_1^2 \hat{n}_{2y}}{\hat{n}_2^2 \hat{n}_{1y} + \hat{n}_1^2 \hat{n}_{2y}}, \quad \hat{t}_p(1,2) = \frac{2\hat{n}_1 \hat{n}_2 \hat{n}_{1y}}{\hat{n}_2^2 \hat{n}_{1y} + \hat{n}_1^2 \hat{n}_{2y}}$$

$$\hat{\rho}_1 = \hat{r}(1,0), \quad \hat{\rho}_2 = \hat{r}(2,1) + \frac{\hat{t}(2,1)\hat{t}(1,2)\hat{\rho}_1\varepsilon_1}{1 - \hat{r}(1,2)\hat{\rho}_1\varepsilon_1}$$

ここで、 d_1 は薄膜 (物質 1) の厚さ、 λ は入射光の波長で、

$$\varepsilon_1 = \exp(-4\pi (d_1/\lambda) b) \times \exp(-4\pi i (d_1/\lambda) a)$$

である。以上を使って、反射率 R は

$$R = |\hat{\rho}_2|^2$$

で表される。以上が薄膜の干渉を考慮したフレネルの反射公式である。

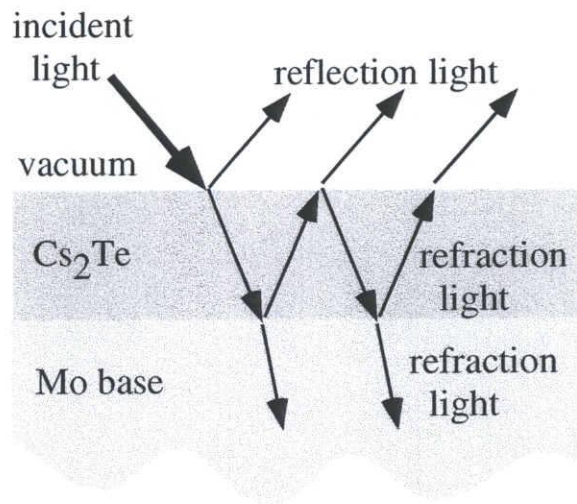


Figure 4.8: 薄膜の干渉のイメージ図

入射光角度依存性の実験結果 (図 4.2、4.3、4.4) と、P 偏光、S 偏光の反射率との関係を、

$$Q_s(\theta) = g \times (1 - R_s(\theta))$$

$$Q_p(\theta) = g \times (1 - R_p(\theta))$$

とおく。ここでは g を比例係数としているが、本来 g は光電子放出の諸現象を担い、電子の平均自由行程、電子の脱出確率なども含まれる。このモデルでは、 g を入射光角度 θ に依存しない単純な比例係数として扱う。また基板からの光電子放出は無視できるものとして扱っている。

4.2.1 セシウムテルライド 薄膜の膜厚と光学定数の見積もり

このモデルは、セシウムテルライド薄膜の膜厚を依存量としている。しかし、今回の研究では、テルルの膜厚は測定しているものの、セシウムテルライド薄膜としての膜厚は

測定しておらず不明な量である。セシウムテルライド薄膜の膜厚については、テルルの膜厚と同じであるとする場合と、Michelatoらの報告 [23] によるテルル膜厚の 2.5 倍とする場合、その中間の 1.5 倍を検討した。また、セシウムテルライドの光学定数は未知であるため、実験値に対してモデルを最小自乗誤差法によりフィットさせ、セシウムテルライドの光学定数として表 4.1 に示した値を見積もり検討した。セシウムテルライド薄膜の膜厚をテルル膜厚の 1 倍、1.5 倍、2.5 倍と仮定して見積もったそれぞれの値については、ここでは最適な値を決めることはできない。これについては、5.3 に後述する。膜厚をテルル膜厚の 1.5 倍としたセシウムテルライドの光学定数を用いたモデルによる計算値と実験結果を図 4.9 に示した。モデルによる計算値は実験結果の傾向をよく表しており、反射率が小さくなりピークを形成する P 偏光の斜入射部分で、量子効率が高くなりピークを形成することを説明できる。ここでモリブデンの光学定数は、よく信頼されている値として、表 4.2 の値を使用した [24]。

wavelength(nm)	Te thickness × 1			Te thickness × 1.5			Te thickness × 2.5		
	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>g</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>g</i>	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>g</i>
250	3.6	1.3	0.23	2.9	1.3	0.23	2.3	1.2	0.23
275	3.8	0.81	0.085	3.1	0.65	0.088	2.4	0.84	0.082
300	4.2	0.63	0.020	3.5	0.69	0.020	2.7	0.85	0.020

Table 4.1: データにモデル式をフィットさせて見積もったセシウムテルライドの光学定数

wavelength(nm)	<i>n</i>	<i>k</i>
250	1.46	3.62
275	2.21	3.87
300	2.77	3.77

Table 4.2: モリブデンの光学定数 [24]

図 4.10 はセシウムテルライド薄膜の量子効率とテルル膜厚の関係を示す。実験値は図 4.2、4.3、4.4 に示した値と同じである。横軸にテルル膜厚をとりプロットしなおしたものであり、上から入射光波長が 250nm、275nm、300nm の量子効率を表す。入射光は P 偏光で、入射光角度が 0°、60° の量子効率である。それぞれの波長においてこの膜厚の範囲ではいずれも 10nm の量子効率が最も高く 5nm、15nm では少し下がる傾向がある。図 4.10 に、実線 (0° 入射) および点線 (60° 入射) で示す計算値と測定結果は傾向がよく一致している。光の干渉効果によって入射光の $1 - R$ には膜厚依存が生じ、それゆえ膜厚変化により量子効率が変わることが説明できる。

フォトカソードとして電子銃に実際に装着する場合において、セシウムテルライド薄膜の作製の際に、テルルの膜厚、セシウムの蒸着量に誤差が生じることが考えられる。図

4.10に示すようにテルルの膜厚 $10 \pm 5\text{nm}$ の誤差が生じたとしても、量子効率の変動は 20%程度にとどまる。また図 4.9に示すようにセシウムの蒸着条件の違いに対して量子効率の変動は 10%程度である。

今回の実験ではセシウムテルライド薄膜の膜厚は、モリブデン基板の表面粗さ (平均 70nm) より薄いにもかかわらず、測定では入射角度 60° から 70° で量子効率 (P 偏光) はピークが観測されていて、斜入射において量子効率の優位性は充分保たれている。

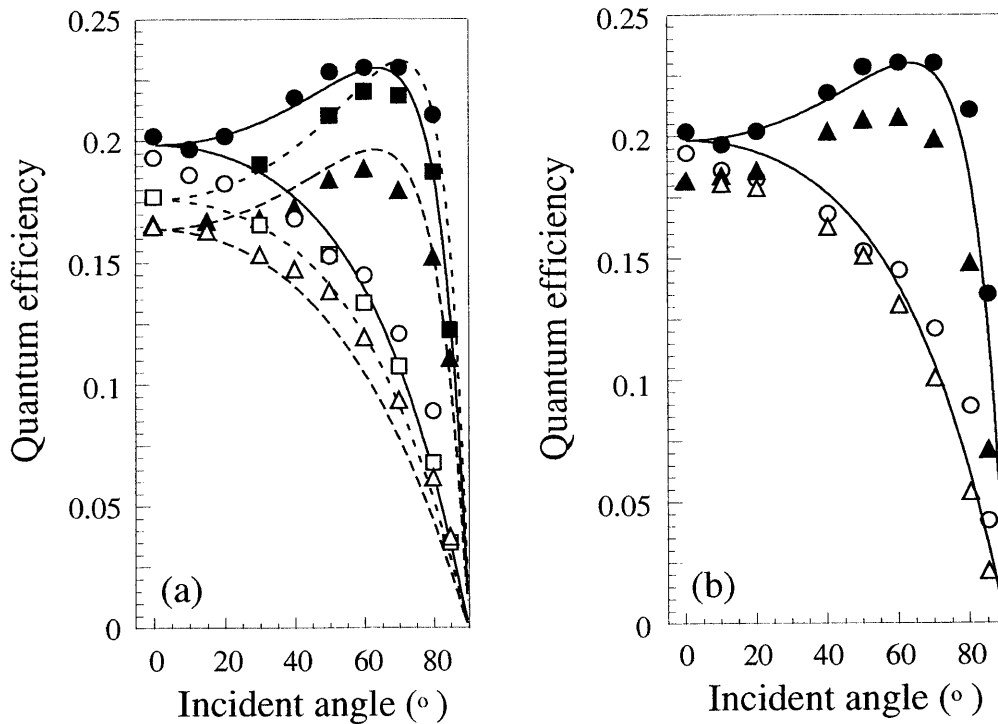


Figure 4.9: セシウムテルライドの量子効率入射光角度依存性。入射光波長は 250nm。曲線は表 3.1 の光学定数を用いた計算値である。(a):図 3.3 に示したサンプルと同サンプル。▲, △はそれぞれ P 偏光、S 偏光でテルル膜厚が 5nm、●, ○はテルル膜厚が 10nm、■, □はテルル膜厚 15nm の実験結果である。(b):図 3.6 に示したものと同サンプル。▲, △はセシウムの蒸着条件が (1) で、●, ○は蒸着条件が (2) の実験結果である。

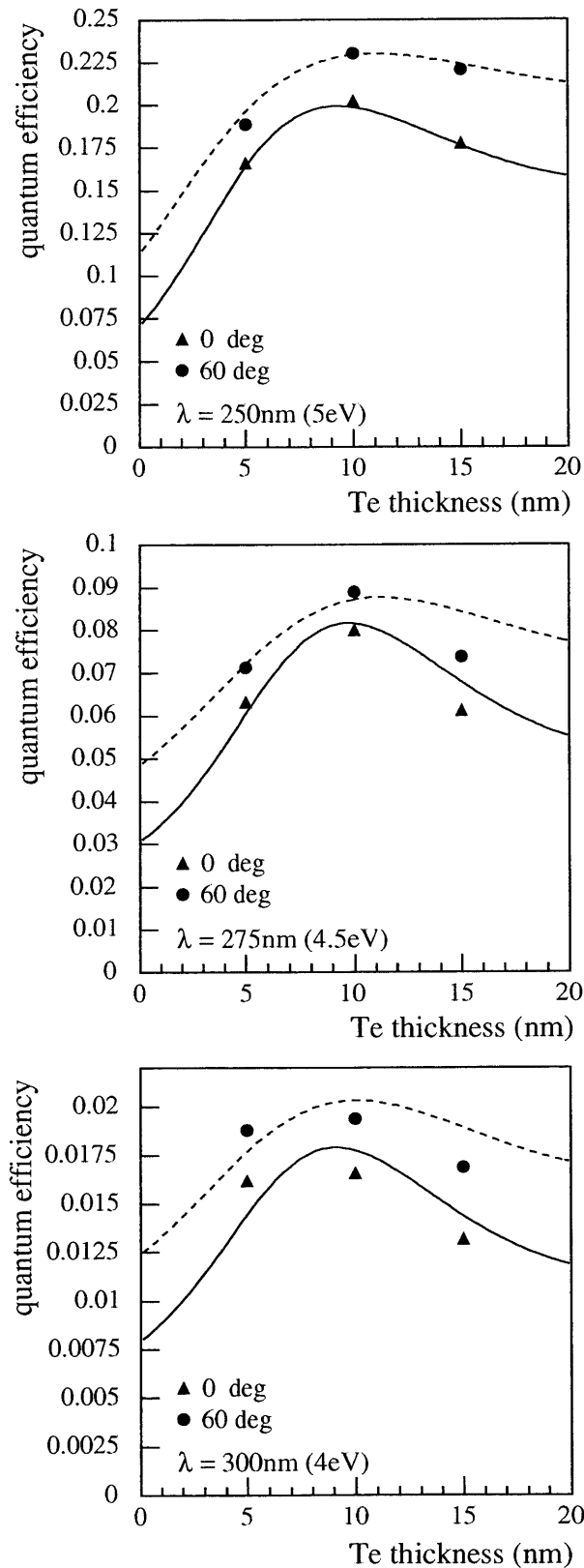


Figure 4.10: セシウムテルライドの量子効率とテルル膜厚の関係。上から順に入射光波長が 250nm、275nm、300nm での量子効率である。入射光は P 偏光で、入射光角度 0° (▲)、 60° (●) のデータである。実線は表 3.1 の光学定数を用いた $\theta=0^\circ$ の計算値、点線は $\theta=60^\circ$ の計算値である。

Chapter 5

セシウムテルライド 薄膜の量子効率膜厚依存性

図 4.10でも一部を示したが、セシウムテルライド 薄膜の量子効率は膜厚に依存する。ここではさらに広い範囲の膜厚依存性の測定結果を示す。また量子効率の入射光エネルギー (波長) 依存性の膜厚による変化を示す。

5.1 測定結果

図 5.1に測定結果を示す。縦軸に量子効率、横軸にテルルの膜厚を示している。本研究ではセシウムテルライド 薄膜の膜厚は直接測定していない。ここではセシウムテルライド 薄膜作製中にモニタしているテルルの膜厚を示した。エタノールによる超音波洗浄と、超高真空内での加熱処理を行った通常の処理によるモリブデン基板上に作製したサンプル (●) と、装置に装着する前に SEM による表面分析を行い、電子線にさらされた後、通常の洗浄を行ったモリブデン基板上に作製したサンプル (○) の量子効率を示した。SEM を用いて表面分析を行ったモリブデン基板を用いた場合については、基板表面の変化などを調べていないが、量子効率の系統的な変化を観測した。入射光波長は全ての点で 250nm である。セシウムテルライド 薄膜の量子効率は作製直後から経時的に変化する。量子効率が十分安定するには薄膜作製後 20 から 30 時間程度の時間経過が必要である。ここに示した全ての点は作製後 40 時間以上経過している。

図 5.1において、両データともテルル膜厚が 10nm 付近にピークが観測された。このピークは 4.2に述べたが、セシウムテルライド 薄膜内での入射光の干渉による効果であると考えられる。SEM による表面分析を行った後に、真空チェンバーに装着した基板を用いたサンプルの量子効率は、通常の基板を用いたサンプルの量子効率の 50%程度である。通常の基板を用いたサンプルではテルル膜厚が 10nm を超えるとテルル膜厚が厚くなるにつれて量子効率は低くなる。一方、SEM による表面分析をおこなった基板を用いたサンプルではテルル膜厚 15nm 以上での量子効率はほぼ平坦である。

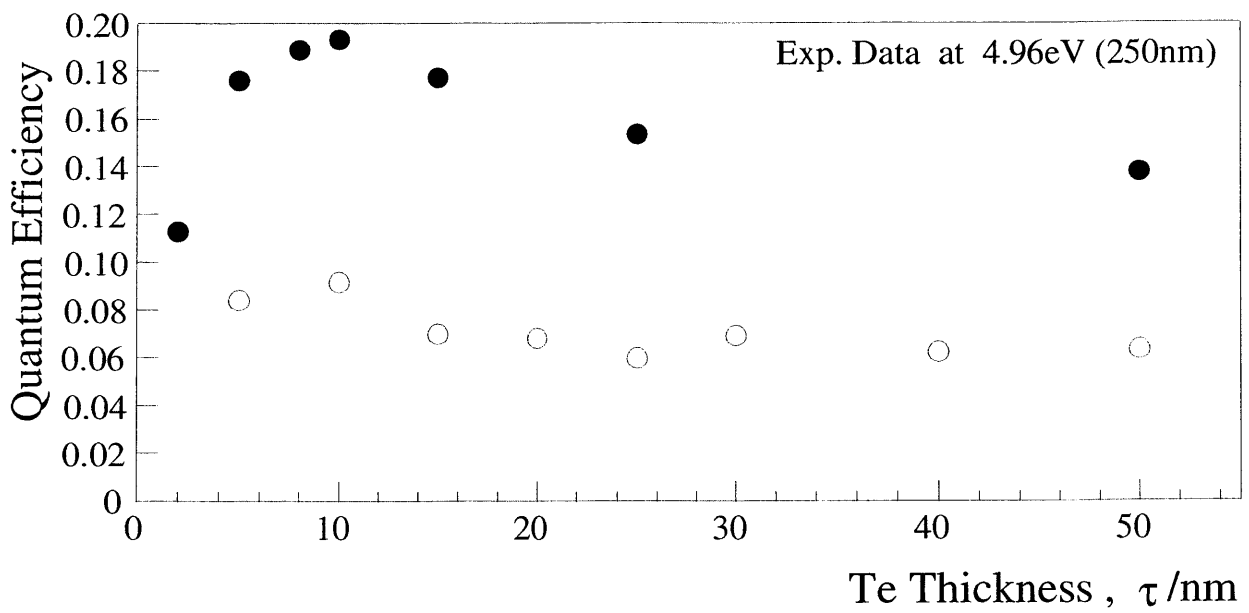


Figure 5.1: セシウムテルライド薄膜の量子効率膜厚依存性測定の結果。縦軸がセシウムテルライド薄膜の入射光波長 250nm のときの量子効率、横軸はテルル膜厚である。●は通常のリニウム基板を使用したサンプル。○は装置に装着する前に、SEM による表面分析を行い電子線にさらされたリニウム基板を使用したサンプル。

5.2 量子効率の入射光エネルギー依存性における膜厚依存性

図 5.2にセシウムテルライド薄膜の、テルル膜厚を変化させた量子効率の入射光エネルギー依存性の測定結果を示す。縦軸は量子効率、横軸は入射光のエネルギーである。テルルの膜厚が 2nm(●)、10nm(○)、25nm(▲) のサンプルの量子効率である。薄膜作製からの経過時間はいずれの点も 40 時間以上経過している。入射光エネルギー 3.8eV 以下の領域ではテルルの膜厚が大きいほど量子効率は低い。入射光エネルギー 4eV を上回る領域では図 5.1に示したように、テルルの膜厚が 10nm のサンプルの量子効率が最も高い。

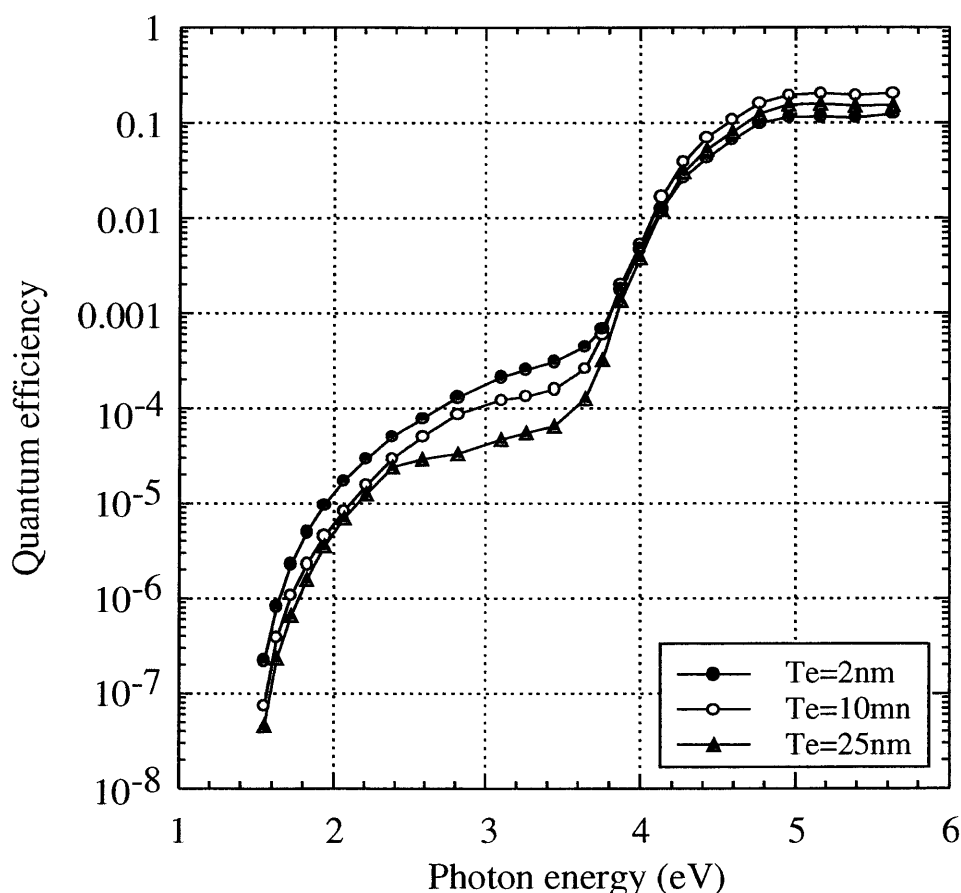


Figure 5.2: セシウムテルライド薄膜の量子効率入射光エネルギー依存性測定の結果。いずれも通常のリブデン基板を使用したサンプルで、テルル膜厚が●は 2nm、○は 10nm、▲は 25nm のサンプルである。

5.2.1 閾値エネルギー以下の量子効率の考察

図 5.3にテルル膜厚が 2nm のサンプル (●) と、リブデン基板にセシウムのみ蒸着したサンプル (○)、熱処理後何も蒸着しなかったリブデン (▲) の量子効率の入射光エネルギー依存性の測定結果を示す。縦軸は量子効率、横軸は入射光のエネルギーである。

モリブデン基板にセシウムのみを蒸着したサンプルの量子効率、セシウムを蒸着しない場合の量子効率よりも高く、また閾値エネルギーも低下する。これはセシウムが電子親和性を下げる働きをもつ物質としてよく知られている効果を示している。入射光エネルギー 5eV 程度での量子効率は、テルル膜厚 2nm のサンプルよりも、セシウムのみ蒸着したサンプルの方が 2 桁程度低い。一方入射光エネルギーが 3.5eV を下回る領域での量子効率は、同一基板でないため多少異なるが、ほぼ同等である。これは入射光エネルギーが 3.5eV を下回る領域では、セシウムテルライド薄膜よりもモリブデンからの光電子放出が主に効いていることを示している。

他の研究ではこの領域での量子効率の振舞いは、組成比の問題 (Cs_xTe , $x \neq 2$)、あるいは表面に過剰なセシウムが蒸着された効果として議論されている [15][25]。

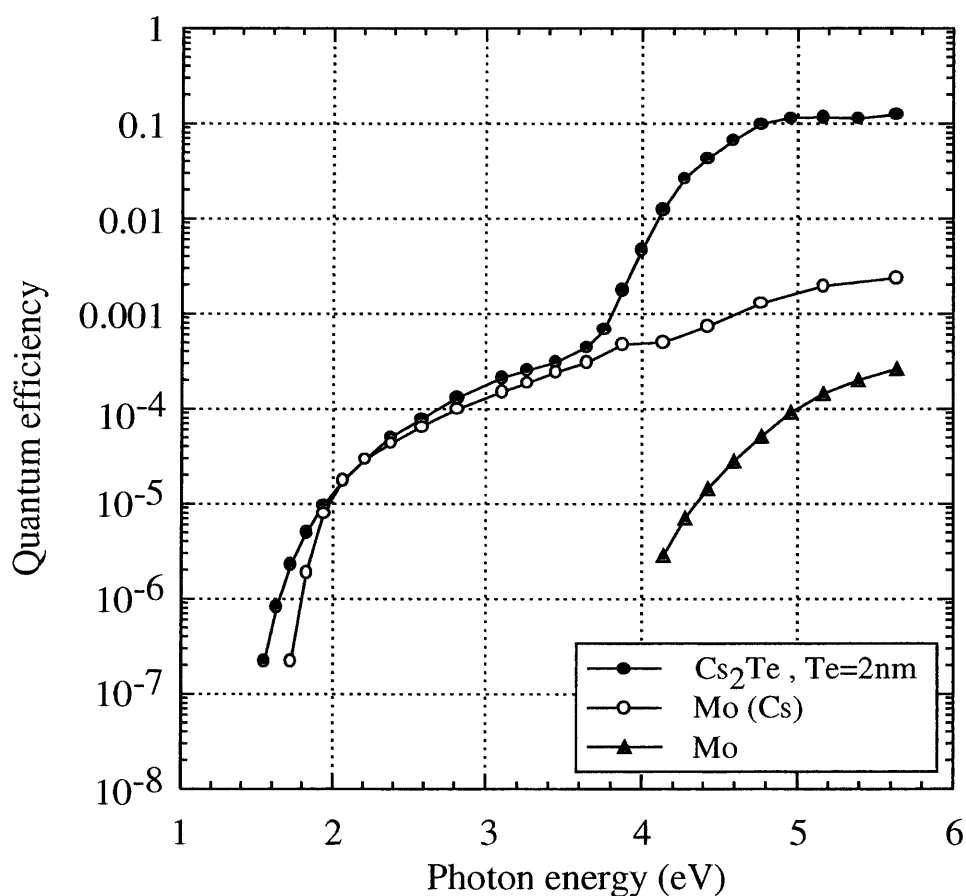


Figure 5.3: セシウムテルライド薄膜 (●) とモリブデン基板にセシウムのみ蒸着したサンプル (○)、熱処理後何も蒸着していないモリブデン基板 (▲) の量子効率入射光エネルギー依存性測定の結果。いずれも通常のもリブデン基板を使用したサンプル。セシウムテルライド薄膜は、テルル膜厚が 2nm のサンプル。

セシウムの蒸着時の膜の色の変化は、テルル膜厚が 2nm のサンプルでは変化がなく透明である。テルル膜厚が 10nm のサンプルでは、セシウム蒸着開始後色が変化し始め、黄色、茶色、紫色を経て青色になる。テルル膜厚が大きいサンプルではセシウム蒸着開始後

から、黄色、茶色、紫色、青、黄色、赤、青、緑、黄色、赤、とどンドン色が変化する。これは可視光の薄膜の干渉によるものであると考えられ、セシウム蒸着とともにセシウムテルライド薄膜の膜厚がどんどん増していく過程が見えているものと考えている。色は一定以上セシウムを蒸着し続けると変化しなくなる。これは先に蒸着したテルルの膜厚による。図 5.4 にテルル膜厚が 50nm のサンプルの写真を示す。このサンプルは薄膜としては均一性が損なわれているが、薄膜の中心から遠い周辺部で不均一な膜厚の干渉による色の変化の様子がわかる。このことから可視光領域でセシウムテルライドは透明であることが予想される。従って入射光が可視光であるとき、光はモリブデン基板に到達していると考えられる。

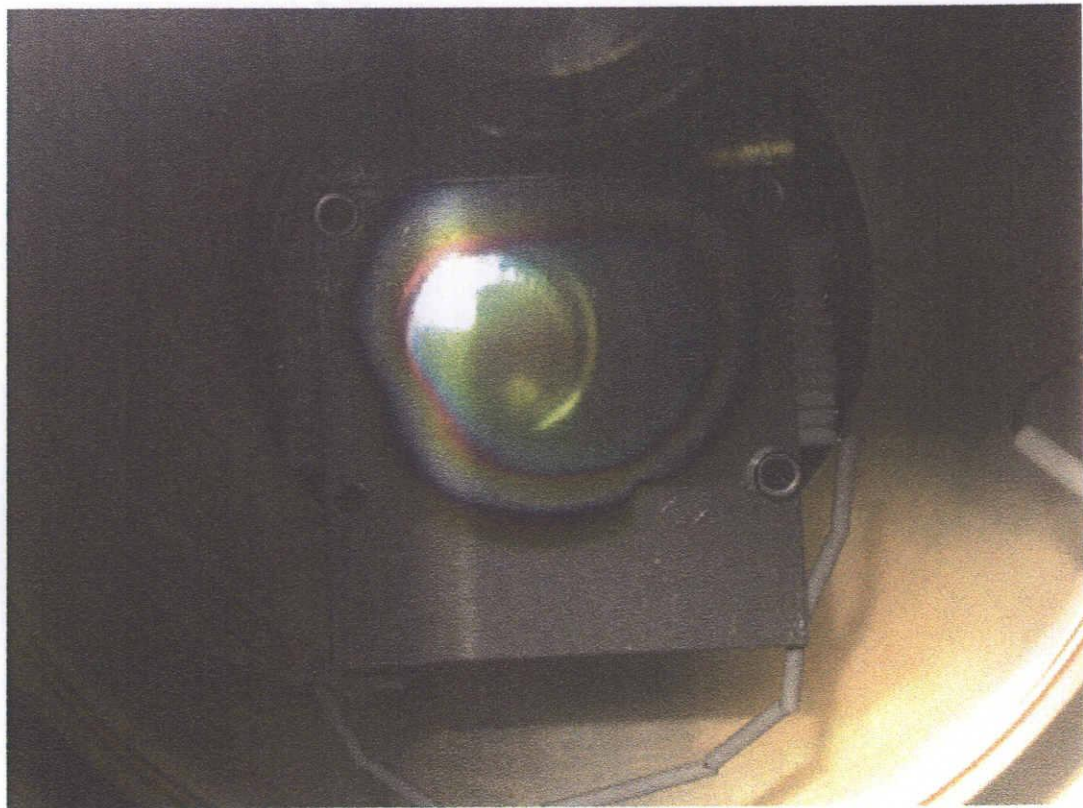


Figure 5.4: セシウムテルライド薄膜の色。このサンプルはテルルの膜厚が 50nm である。セシウムは色の変化がなくなるまで蒸着した。この論文でこれまでにセシウムの蒸着条件として、過剰蒸着と表現してきたものは色の変化がなくなるまで蒸着している状態である。

5.3 光電子放出モデルを用いた膜厚依存性の検討

4.2 に述べた光電子放出モデルを用いて、膜厚依存性について検討してみる。セシウムテルライド薄膜の量子効率の入射光角度依存性の実験結果を図 5.5 に示す。いずれもテ

ルル膜厚は 10nm、セシウム蒸着条件は同じで、入射光波長は 250nm である。●、○は通常のリニウム基板を使用したサンプルの、▲、△は SEM で表面分析を行った基板を使用したサンプルの P、S 偏光入射時の量子効率 (Q_P 、 Q_S) である。このモデルと図 5.5 の実験結果から、セシウムテルライドの光学定数を見積もった。図 5.5 に示した実験値に対して、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本モデルを、最小自乗誤差法によりフィットさせた。

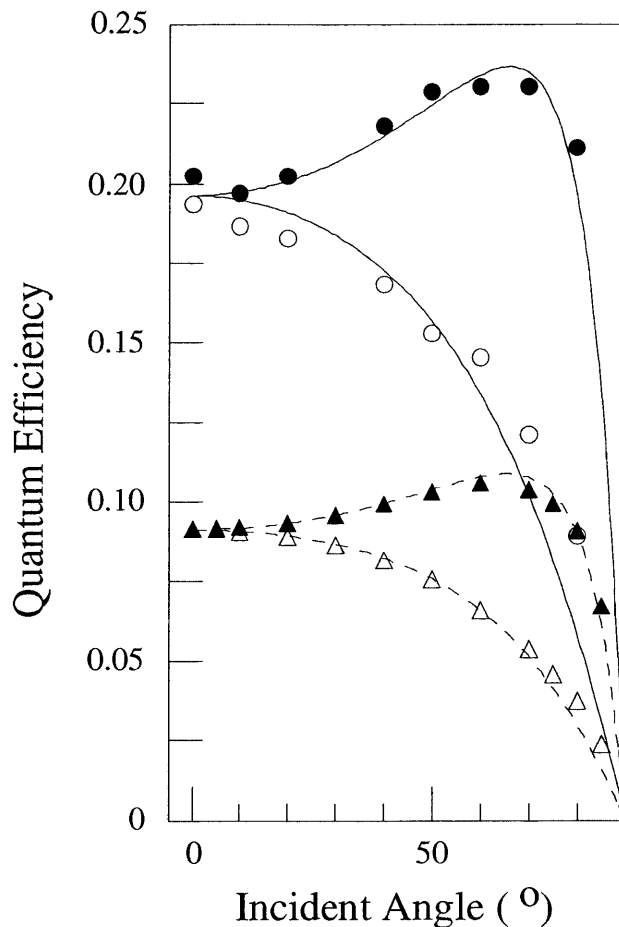


Figure 5.5: セシウムテルライド薄膜の量子効率、入射光角度依存性。いずれも入射光波長は 250nm、テルル膜厚は 10nm、セシウムの蒸着条件は同じである。●、○は通常のリニウム基板を使用したサンプルの、▲、△は SEM で表面分析を行った基板を使用したサンプルの P、S 偏光入射時の量子効率。曲線はモデルによるフィッティングの結果で、セシウムテルライド薄膜の膜厚をテルル膜厚の 1.5 倍とした光学定数を用いたものである。

通常のリニウム基板を用いた場合についてのみ、5nm と 15nm の 0° 入射 (直入射) のデータも使用している。これはデータ点が少なく、フィッティングの際の統計性が悪かったためである。このモデルは、セシウムテルライド薄膜の膜厚を依存量としている。しかし今回の研究では、テルルの膜厚は測定しているものの、セシウムテルライド薄膜としての膜厚

は測定しておらず不明な量である。セシウムテルライド薄膜の膜厚については、テルルの膜厚と同じであるとする場合と、Michelatoらの報告 [23] によるテルル膜厚の 2.5 倍とする場合、その中間の 1.5 倍を検討した。通常のリブデン基板を用いた場合のデータを使って見積もったセシウムテルライド光学定数は表 4.1 に示した。SEM で表面分析を行った基板を用いた場合のデータを使って見積もったセシウムテルライド光学定数は表 5.1 に示した。表 5.1 の値はテルル膜厚が 10nm のときの直線偏光を用いた斜入射の量子効率のデータを使って、見積もった値である。光学定数の見積もりに使ったデータはテルル膜厚が 10nm のもののみで、他の膜厚のデータは使っていない。そのためテルル膜厚 10nm 以外のデータとは独立である。

Te Thickness, $\tau = 10\text{nm}$	$n @ 250\text{nm}$	$k @ 250\text{nm}$
$\tau \times 1.0$	4.1	0.84
$\tau \times 1.5$	3.3	0.79
$\tau \times 2.5$	2.6	0.74

Table 5.1: SEM による表面分析を行ったリブデン基板を使ったデータにモデル式をフィットさせて見積もったセシウムテルライドの光学定数。テルル膜厚 10nm のデータのみ使用して見積もった値で、他の膜厚とは独立である。

入射光依存性の測定結果から見積もった光学定数を使って、今回図 5.1 に示した膜厚依存性の測定結果と、モデル計算値を比較する。セシウムテルライド薄膜の膜厚をテルル膜厚の 1 倍、1.5 倍、2.5 倍として見積もったそれぞれの光学定数を用いたモデル計算値と、実験値を比較したものを図 5.6 に示す。膜厚をテルル膜厚の 1.5 倍としたセシウムテルライドの光学定数を用いたモデル計算値が、実験値と最もよく一致する。これにより、今回測定していないセシウムテルライドの薄膜自体の膜厚は、テルル膜厚の 1.5 倍程度であることが予想できた。このモデルによる計算値は実験結果の傾向をよく表しており、干渉によりテルル膜厚 10nm 付近にピークを作ることが説明できる。

今回、セシウムテルライドの光学定数の見積もりには、電子の平均自由行程や、また反射率については表面粗さを考慮していない。これらの諸現象をも含んだモデルを用いることでより確かな光学定数の見積もりが可能になると考えている。しかしセシウムテルライド薄膜の膜厚が不明であることや、リブデンからの光電子放出を無視していることを考慮すれば、直接反射率を測定することによる光学定数の測定が待たれる。セシウムテルライド薄膜は大気に取り出すと破損する。本研究に用いた装置では残念ながら、サンプルを大気に取り出さずに反射率を測定することはできない。従って、ここで示したセシウムテルライドの光学定数は、厳密な数字ではない。しかしこのモデルと、そこから導出した光学定数を使うと、今回示したセシウムテルライド薄膜の量子効率膜厚依存性測定の結果を定性的に説明することができる。このモデルと、モデルから導出できるセシウムテルライドの光学定数を用いて、まだ知られていないリブデン以外の金属基板を用いた際の特性を予想することができる。実験をする前に量子効率が最大になる最適な膜厚を予測することが可能かも知れない。

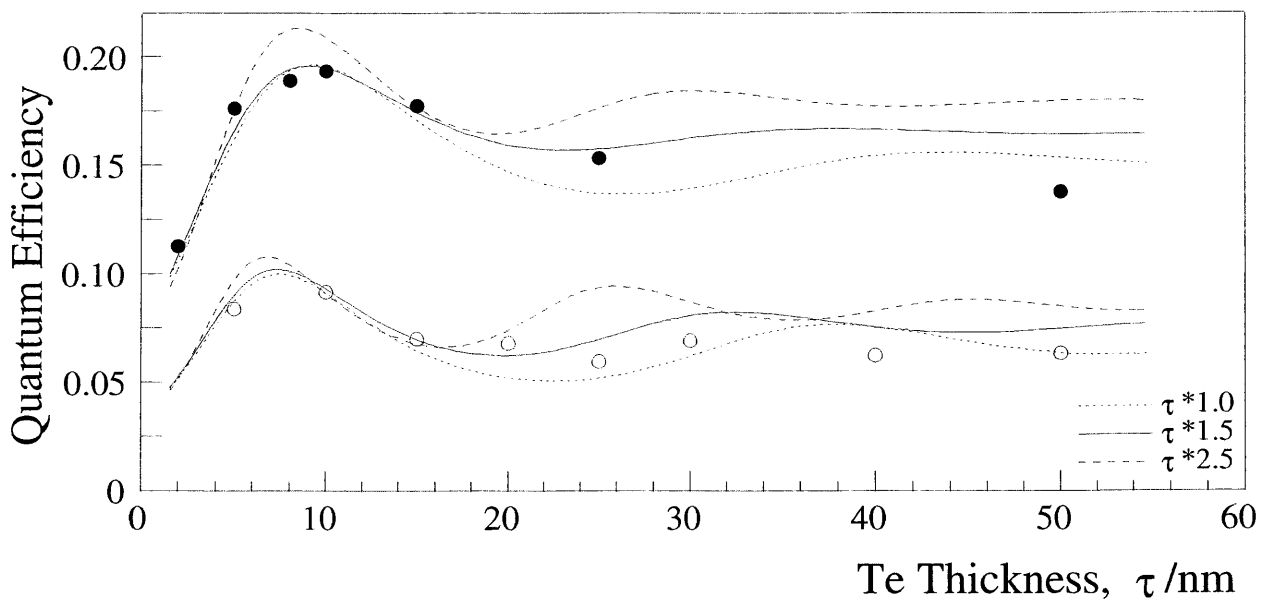


Figure 5.6: セシウムテルライド薄膜の膜厚依存性の検討。●は通常のリブデンを、○はSEMで電子線にさらされたリブデンを基板として用いた、セシウムテルライド薄膜の量子効率の測定値。曲線はモデル計算値で、点線、実線、破線はそれぞれセシウムテルライド薄膜の膜厚を、テルル膜厚の1.0倍、1.5倍、2.5倍とした場合のモデル計算値である。

Chapter 6

セシウムテルライド 薄膜の量子効率基板依存性

セシウムテルライド薄膜を作製する基板としては、Powellらの研究 [15]、Los Alamosの研究 [8]、TTFの研究 [26] など、多くの研究でモリブデン基板が使われている。モリブデン基板を用いたセシウムテルライド薄膜は高い特性を示してきた実績がある。そこで本研究でもモリブデンを採用してきた。モリブデン以外の基板を用いた研究としては CLICの研究が挙げられ、銅に金を蒸着したものをを用いている [10][25]。Sprig-8における高周波電子銃用のフォトカソードとして、浜松ホトニクスと共同開発されたカートリッジ式のセシウムテルライドカソードでは、モリブデンにクロムを蒸着したものが用いられている [27][28]。

6.1 モリブデン以外の金属基板

ここではモリブデン以外に、タングステンと銅を基板として試験した結果を示す。本研究ではセシウムテルライド薄膜の除去には加熱処理の方法を取っている。加熱処理し繰り返し使用するため、基板は熱特性に優れたものが望ましい。高周波電子銃のフォトカソードとして使用する場合は、採用した基板が高周波空洞とあまりギャップのない誘電率を持つ材料であることも考慮する必要がある。タングステンは熱特性に優れた材料であることから、また銅はフォトカソード型高周波電子銃で高周波空洞の材料として採用される材料であることから選び試験した。

図 6.1にモリブデン基板、タングステン基板と銅基板を用いた場合のセシウムテルライド薄膜の量子効率を示す。また、図 6.2に基板そのものの量子効率も示した¹。図 6.1に示すようにセシウムテルライド薄膜は金属基板よりも光源波長 250nm での量子効率が 3 桁から 4 桁高い。金属基板の量子効率は光源波長 250nm では、モリブデンと銅はほぼ同じでタングステンはモリブデン、銅よりも 1 桁低い。セシウムテルライド薄膜の量子効率はモリブデン基板を用いた場合が、最も高く、ついでタングステン基板を用いた場合、

¹モリブデンの仕事関数 4.6eV、タングステンの仕事関数 4.55eV、銅の仕事関数 4.65eV[29]

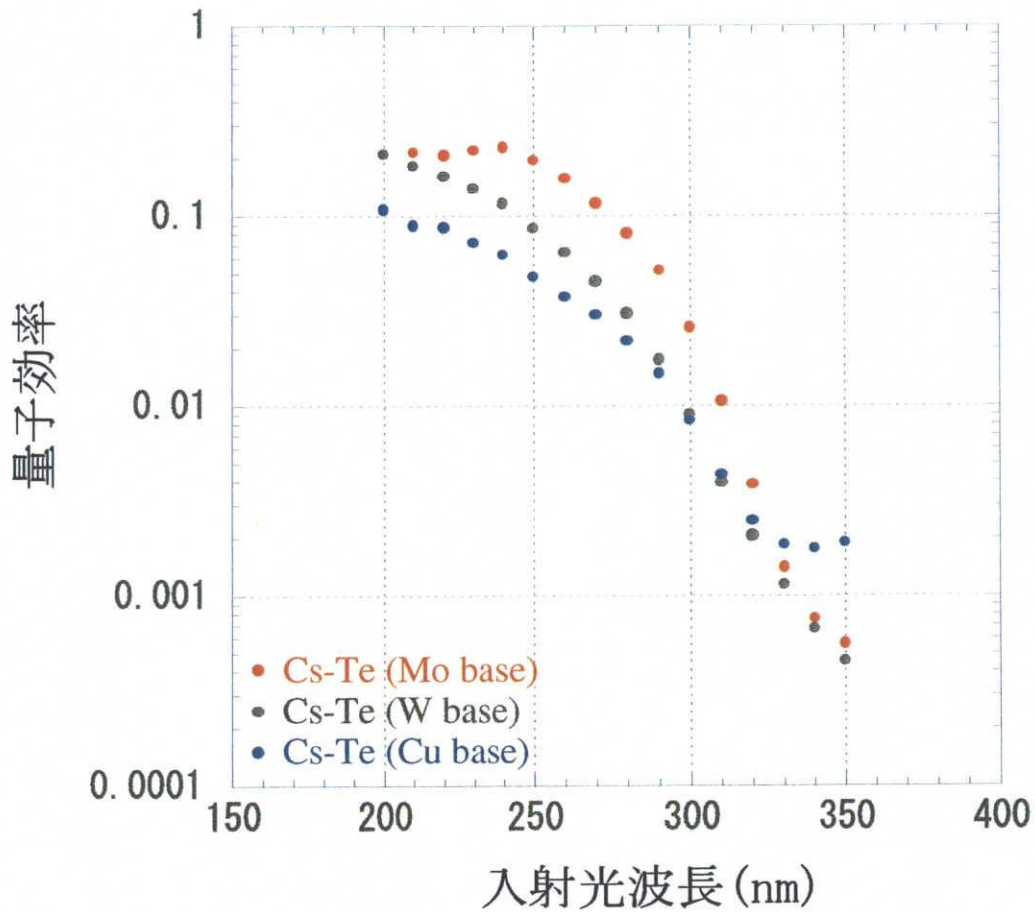


Figure 6.1: セシウムテルライド薄膜の量子効率。モリブデン基板 (赤)、タンゲステン基板 (黒)、銅基板 (青) の比較。縦軸は量子効率、横軸は入射光波長である。テルル膜厚はいずれも 10nm、セシウムの蒸着条件はほぼ同じである。

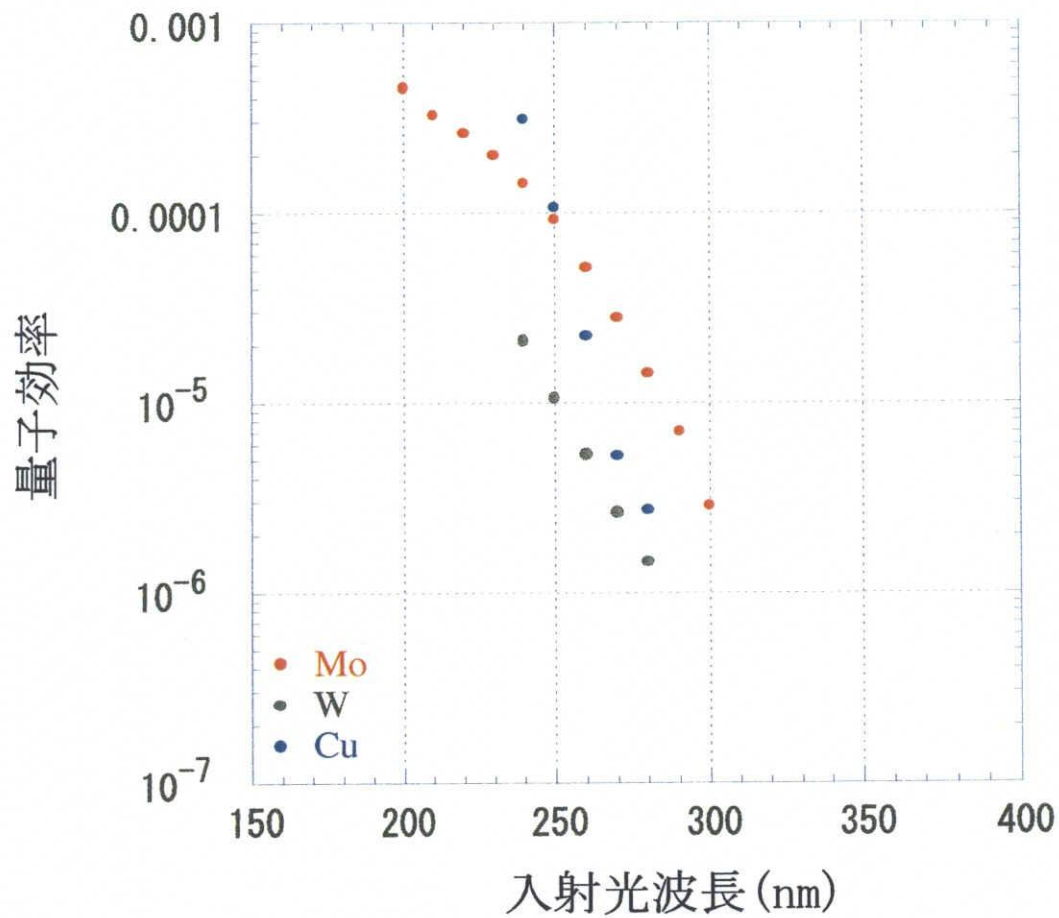


Figure 6.2: セシウムテルライド薄膜を作製していないモリブデン基板 (赤)、タングステン基板 (黒)、銅基板 (青) の量子効率。縦軸は量子効率、横軸は入射光波長である。

最も低かったのは銅基板を用いた場合であった。波長 250nm、270nm における量子効率 はモリブデンを用いた場合 0.20、0.12、タングステンを用いた場合 0.086、0.045、銅を用 いた場合 0.048、0.030 である。この試験によりセシウムテルライド薄膜の量子効率は作 製する基板に依存することが明らかとなった。

基板依存として考えられることとして、材料の違いのみならず基板の表面粗さも効く ものと予想できる。今回使用した基板の表面粗さは、銅については測定していないが、モ リブデン基板は平均で $0.069\mu\text{m}$ 、タングステン基板は $2.51\mu\text{m}$ である。図 6.1 に示した実 験結果では、タングステン基板を用いたサンプルよりもモリブデン基板を用いたサンプル の方が量子効率が高い。このことから表面粗さの小さな基板を用いると量子効率が高くな る可能性が示唆される。しかし後述するが基板の表面粗さだけでは、量子効率の変化は説 明できないほど大きい。

他の原因として材料の反射率の違いが考えられる。図 6.3 にモリブデン、タングステ ン、銅の反射率を示す。今回は基板の反射率は直接測定していない。ここで示した反射率 はよく信頼されている値として文献 [24] に示されている光学定数から算出した。本研究 のセシウムテルライド薄膜は、バルク様ではなく薄膜であり、入射光は基板に到達し基板 表面でも反射しているものと考えられる。基板表面からの反射率が高く、セシウムテルラ イド薄膜を通る光がより多いほど量子効率が高い可能性が示唆される。

この領域でさらに高い反射率を持つ金属基板については、本研究では残念ながら試験 していない。蒸着条件の違いや装置依存があり他の研究と比較することは難しいが、CLIC の研究ではセシウムテルライド薄膜を作製する基板として銅に金を蒸着したものが用い られており、5eV 付近での量子効率は本研究とほぼ同等である (図 6.8)[25]。

高周波電子銃用のセシウムテルライド薄膜フォトカソードに用いる薄膜基板は、薄膜 作製と薄膜除去に加熱処理の方法を採用している場合は、加熱による除去を繰り返す。こ れに耐える基板を採用しなければならない。この研究で試験した銅基板は 600°C の加熱 処理の後、表面が目視で確認できるほど変質した。KEK-ATF 実験で、薄膜除去の方法と してイオンスパッタリングが用いられたが、そこでも同様の銅基板の表面の変質を確認し ている [13]。前述のカートリッジ式の方法では使い捨てることができ、この問題を解決す るひとつの回答であると言える。セシウムテルライド薄膜の基板金属は、これらの薄膜除 去に耐えることが求められ、安定な基板としてはモリブデン基板が筆頭で、その他は研究 課題となっているのが現状である。

6.2 基板の表面粗さ

基板の表面粗さは作製したセシウムテルライド薄膜の量子効率に関連することが予想 される。またフォトカソード電子銃で光の入射方法として斜入射を採用する場合、表面粗 さの大きな基板を用いると、前述した P 偏光斜入射時の量子効率のピークがなまること が予想される。ここでは平均の表面粗さ (Ra) が $46.4\mu\text{m}$ と $21.7\mu\text{m}$ のモリブデン基板を 用意して実験した結果を示す。このモリブデン基板はモリブデン材料をフライス盤で切削 したもので、切削条件は回転数 440、26mm/min で、Ra が $46.4\mu\text{m}$ のサンプルは超綱チ ップ、潤滑剤はブルーベを使用したもの、Ra が $21.7\mu\text{m}$ のサンプルは一般用エンドミル、潤

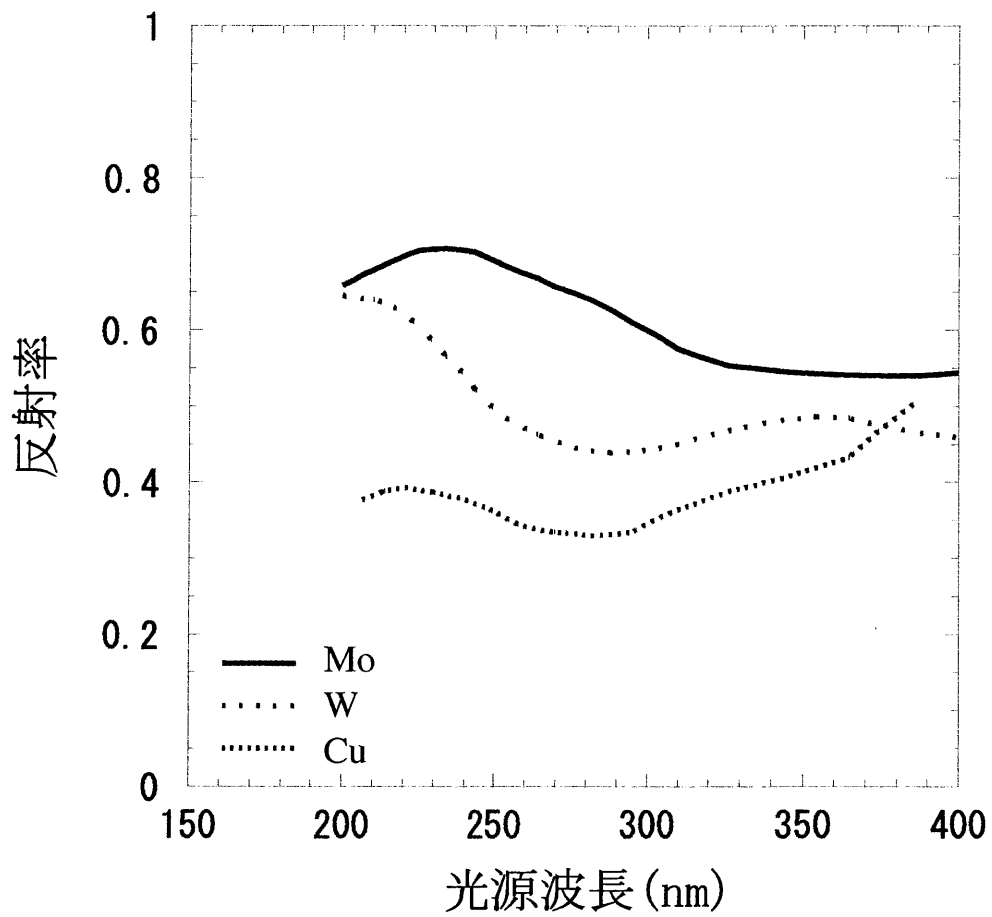


Figure 6.3: モリブデン、タングステン、銅の反射率

滑剤はジクロロエタンとそれに加えてほんの少しのブルーベを使用したものである²。

Raが $46.4\mu\text{m}$ のサンプルとRaが $21.7\mu\text{m}$ のサンプルを用いたセシウムテルライド薄膜の実験結果として、図6.4に入射光波長を変化させた量子効率を示す。比較のため、Raが $0.07\mu\text{m}$ のモリブデン基板の結果を示す。セシウムテルライド薄膜の作製の際の蒸着条件は、基板の表面粗さを除いて全てのサンプルで同じである。Raが $46.4\mu\text{m}$ の基板を用いたサンプルと $21.7\mu\text{m}$ の基板を用いたサンプルでは大きな変化は観測できず、ほぼ一致した量子効率を示した。それに対して、Raが $0.07\mu\text{m}$ の基板を用いたサンプルと、ここで表面粗さの大きい用意した基板を使用したサンプルの量子効率には変化が認められる。入射光波長 250nm における量子効率はRaが $0.07\mu\text{m}$ の基板を用いたサンプルで 0.20 であったのに対して、Raが $46.4\mu\text{m}$ 、 $21.7\mu\text{m}$ の基板を用いたサンプルではそれぞれ 0.15 、 0.15 であった。Raの3桁の変化に対して、量子効率は 20% 程度変化することを確認した。

図6.5にRaが $46.4\mu\text{m}$ と $0.07\mu\text{m}$ の基板を用いたサンプルの入射光に直線偏光を用いて、入射光角度を変化させた量子効率を示す。特性を比較するため(プロットシェイプ比較のため)Raが $0.07\mu\text{m}$ の基板を用いたサンプルの量子効率は 0° での量子効率が同じになるように、Raが $46.4\mu\text{m}$ のものにノーマライズしている。予想の通り大きな表面粗さの基板を用いたサンプルでは、斜入射部分(P偏光)でのピークがなまることが観測できた。P偏光入射時のピークがなまるのみならず、S偏光においても系統的な変化を確認できる。入射光の波長と比較して表面粗さの大きな基板では、偏光が混ざり無偏光に近い形になるものと考えられる。しかしながら、Raが $46.4\mu\text{m}$ もの非常に大きな表面粗さの基板を用いてもなお、P偏光入射時の量子効率にはピークが観測され、光の入射方法として斜入射が有利であることが言える。また斜入射を採用する際は、直入射を採用する場合よりもさらに、用いる基板の表面粗さを小さく抑えることが重要であることが確認できた。

図6.4に示した結果よりさらに広い領域の量子効率を図6.6に示す。 3eV 以上の領域でRaが $0.07\mu\text{m}$ の基板を用いたサンプルは他の2サンプルの量子効率を上回っていたが、一方 2.5eV 以下の領域ではRaが大きい2サンプルの方が量子効率が高いという結果が観測された。

この試験は3サンプルのみの比較ではあるが、セシウムテルライド薄膜フォトカソードの量子効率は、用いる基板の表面粗さに依存することが確認できた。セシウムテルライド薄膜からの光電子放出の考察(4.2)において前述したモデル計算では基板の表面粗さを無視している。そのため、見積もったセシウムテルライドの光学定数には基板の表面粗さの効果が含まれており、セシウムテルライド薄膜の真の膜厚わかっていたとしても、実際の光学定数とは異なる値が見積もられることが予想される。

6.3 モリブデン基板の劣化

ここでモリブデン基板の劣化についてふれておく。本研究ではセシウムテルライド薄膜を作製するモリブデン基板は、薄膜作製と 600°C の加熱による除去を繰り返して使用

²この二つの基板の製作は名古屋大学全学技術センターの香月 真澄氏、名古屋大学大学院理学研究科、高エネルギースピ物理研究室の浪花 健一氏、酒井 良介氏にご協力頂きました。

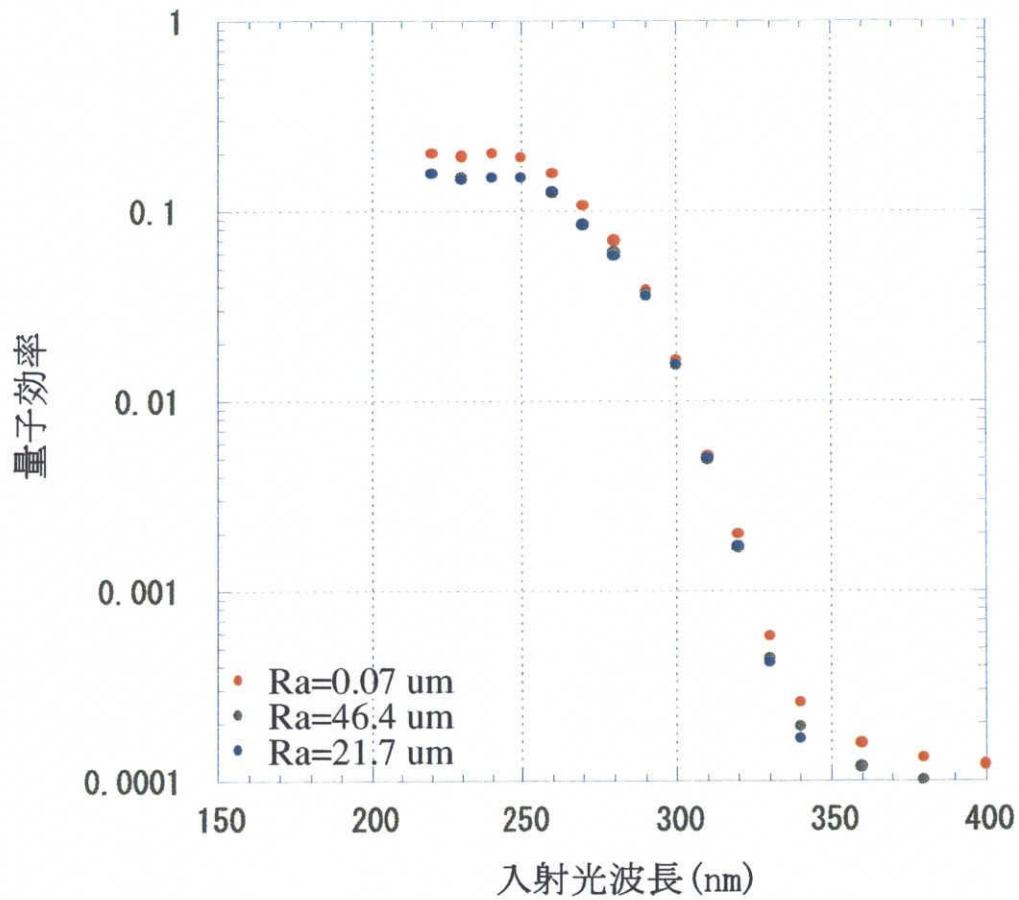


Figure 6.4: セシウムテルライド薄膜の量子効率、基板の表面粗さ依存性。縦軸は量子効率、横軸は入射光の波長である。平均の表面粗さ (Ra) が $0.07\mu\text{m}$ (赤)、 $46.4\mu\text{m}$ (黒)、 $21.7\mu\text{m}$ (青) のモリブデン基板を用いたもの。テルル膜厚はいずれも 10nm 、セシウムの蒸着条件はほぼ同等である。

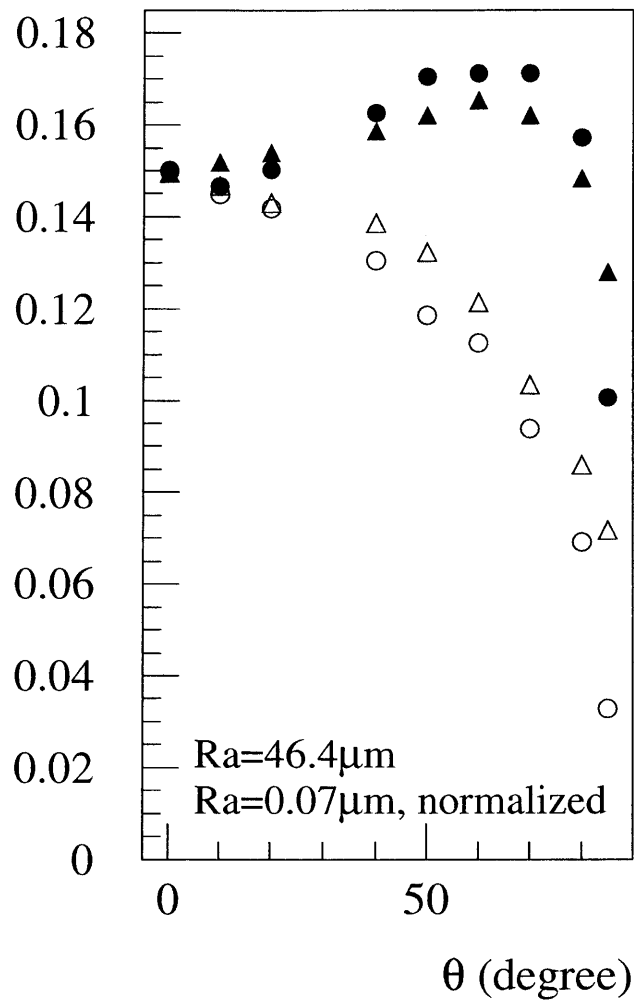


Figure 6.5: セシウムテルライド 薄膜の量子効率、直線偏光を用いた入射光角度依存性。
 \blacktriangle , \triangle (P,S 偏光) は R_a が $46.4\mu\text{m}$ の、 \bullet , \circ (P,S 偏光) は R_a が $0.07\mu\text{m}$ の基板を用いたもの。 \bullet , \circ はノーマライズしたものである。

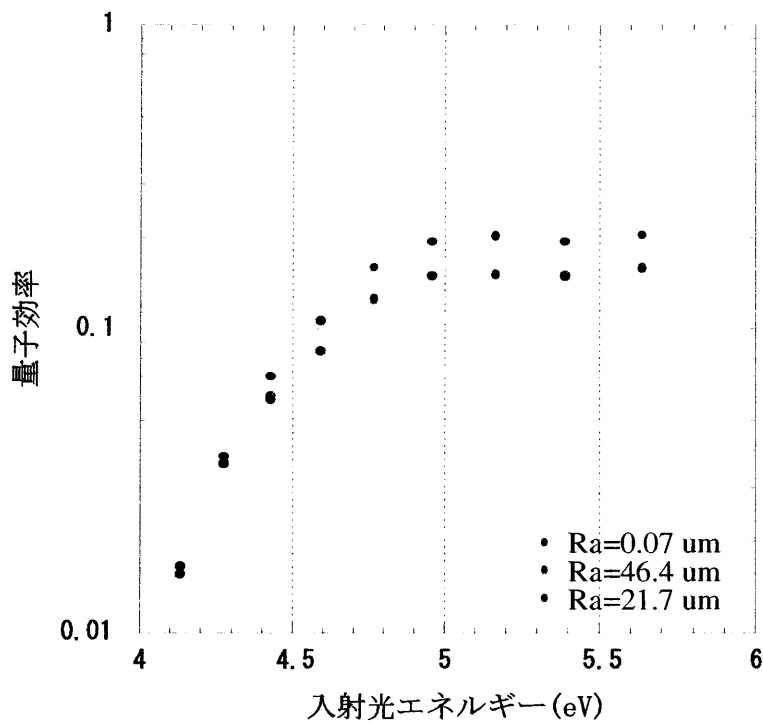
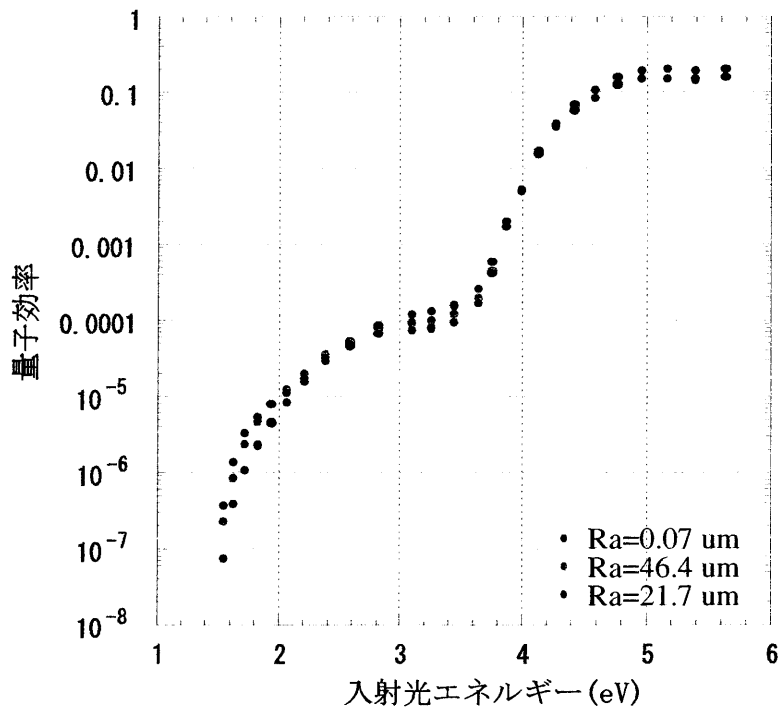


Figure 6.6: セシウムテルライド 薄膜の量子効率の入射光エネルギー依存性。平均の表面粗さ R_a の異なる基板を用いた場合の比較。赤で示したプロットは R_a が $0.07\mu\text{m}$ 、黒は $46.4\mu\text{m}$ 、青は $21.7\mu\text{m}$ の基板を用いたサンプルを用いた測定結果。縦軸は量子効率、横軸は入射光のエネルギーを示している。下図は上図の横軸 4eV 以上の領域のみ示したもの。

している。繰り返し使用による量子効率の変化は積んだテルル膜厚の積分値で 50nm 程度までは小さく、入射光波長 250nm で数%程度である。蒸着条件の誤差からくる量子効率の変化を考慮すると、テルル膜厚 10nm のサンプルを 5 回作る程度では、基板の繰り返し使用による量子効率の変化は無視できる。しかし、積んだテルルの積分値が 200nm を超えると変化は顕著で、入射光波長 250nm に対する量子効率は 50%以上低下する。薄膜作製の繰り返しか、あるいは薄膜除去の際の加熱処理が劣化をまねくのかはつきとめていない。

図 6.7 にモリブデン基板の劣化が原因と予想されるセシウムテルライド 薄膜の量子効率の入射光エネルギー依存性測定の結果を示す。赤で示したプロットは繰り返し使用によるテルル膜厚の積分値が 25nm の基板を用いたサンプル、青はテルル膜厚の積分値が 200nm を超えている基板を用いたサンプルの量子効率である。黒で示したプロットは、真空チェンバーに装着する前に SEM で表面分析を行い電子線にさらされた基板を使ったサンプルの量子効率である。いずれもテルル膜厚が 10nm のサンプルで、セシウムの蒸着条件は同じである。赤と青の量子効率の入射光エネルギー依存性は 3.5eV 以下の領域ではほぼ同等である。一方、3.5eV を上回る領域では 50%程度の変化が見られる。SEM による表面の分析によって、モリブデン基板に作製したセシウムテルライド 薄膜は 600°C の加熱処理で除去できることを確かめているが、除去しきれなかったセシウムテルライドが微量ずつ残ることが原因で起こる劣化である可能性もある。繰り返し使用によるモリブデン基板の劣化の原因はつきとめられなかったが、系統的に劣化が進むことを確認した。

黒のプロットではエネルギー依存性上の閾値エネルギーの肩の立上り位置が 0.5eV 程度高エネルギー側にシフトしている。この基板では繰り返し使用によるテルル膜厚の積分値が 200nm を超えても、量子効率の変化は数%程度であった。赤のプロットと比較して 2 桁程度低い量子効率を示す領域が観測されている。閾値エネルギーの変化は、基板上に作製したセシウムテルライド 薄膜の構造や組成の変化から来るものであることが予想される。

このような閾値エネルギーの高エネルギー側へのシフトは、CLIC の研究において高周波電子銃に装着し、電子引き出しを行った後にも観測されることが報告されている (図 6.8)[25]。CLIC の報告からは基板劣化とは直接関係があるとは言えない。実際に高周波電子銃に実装し電子引き出しを行う際、温度が上昇することも予想され、セシウムテルライド 薄膜は作製した後も構造や組成が変化する可能性がある。本研究の SEM で表面分析を行い電子線にさらしたモリブデン基板を用いたセシウムテルライド 薄膜は、CLIC の報告による高周波電子銃のフォトカソードとして使用し電子引き出しを行った後のものと、量子効率の入射光エネルギー依存性の閾値エネルギーの変化がほぼ同等であり、同じ性質のセシウムテルライドである可能性が示唆される。閾値エネルギー以下の振舞いについてはかなり異なっている。これについては用いる基板の違いによるものと推察している。

本研究においては、モリブデン基板の劣化について、基板がどうなったのか、あるいは劣化した基板上に作製したセシウムテルライド 薄膜の構造や組成などの研究は行っていないが、量子効率の変化は観測した。このような劣化が他の金属基板を用いた際にも起こることであるのか確かめていない。繰り返し使用に強い他の基板材料の探索、あるいは劣化を考慮する必要のない基板を用いた繰り返し使用をしないシステムの開発が求められる。

またセシウムテルライド 薄膜の作製後の変化についても系統的な研究が待たれる。

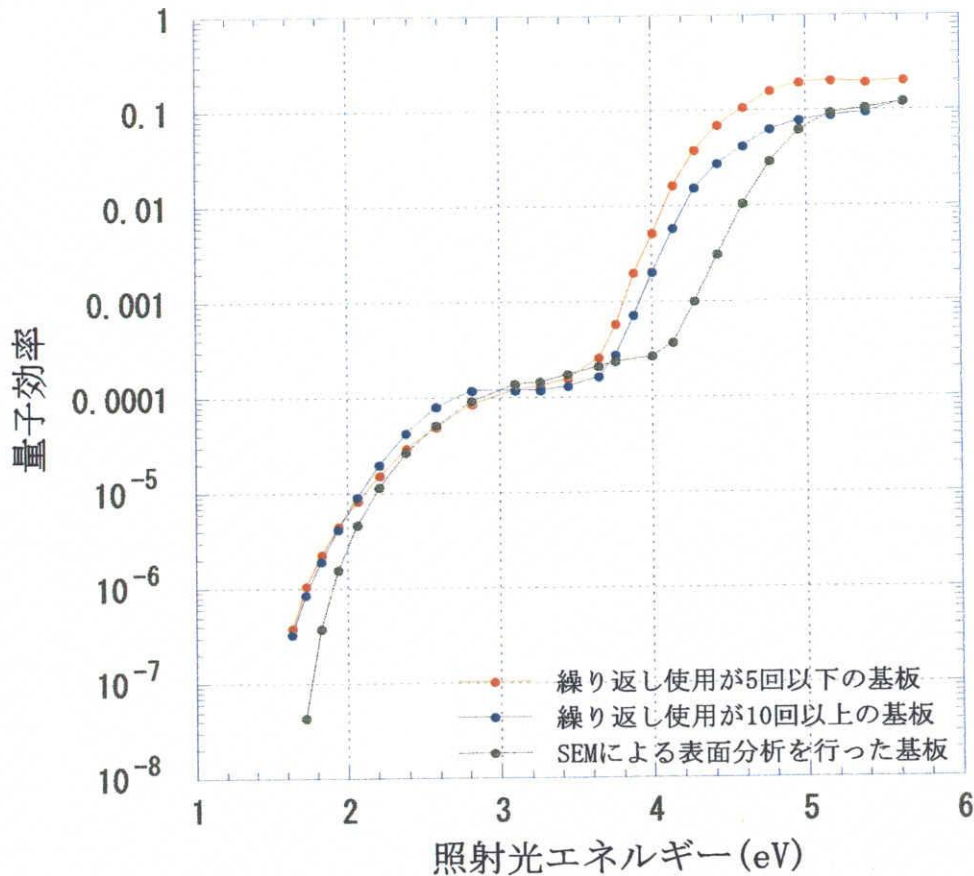


Figure 6.7: セシウムテルライドの量子効率。モリブデン基板の劣化。

6.4 光電子放出モデルを用いた量子効率の基板依存の検討

ここで、既に述べている光電子放出モデルを用いた基板依存の検討を行う。セシウムテルライドの光学定数は、表 4.1に示した値 (セシウムテルライド 薄膜の膜厚をテルル膜厚の 1.5 倍と仮定して見積もった値) を使ったモデル計算値を用いて、基板依存性について検討する。

図 6.9にモリブデン、タングステン、銅を基板として用いた場合の、光電子放出モデルの計算値の比較を示す。縦軸に量子効率、横軸にテルルの膜厚を示した。実線がモリブデン基板、破線がタングステン基板、点線が銅基板を用いた場合の、入射光波長 250nm に対する量子効率のモデル計算値である。ここで用いたモリブデンの光学定数は表 4.2に示した値を、タングステン、銅の光学定数は表 6.1に示した値を使った。図 6.9では、比較のため、モリブデン基板を用いた場合のセシウムテルライド 薄膜の量子効率の実験結果を示した。

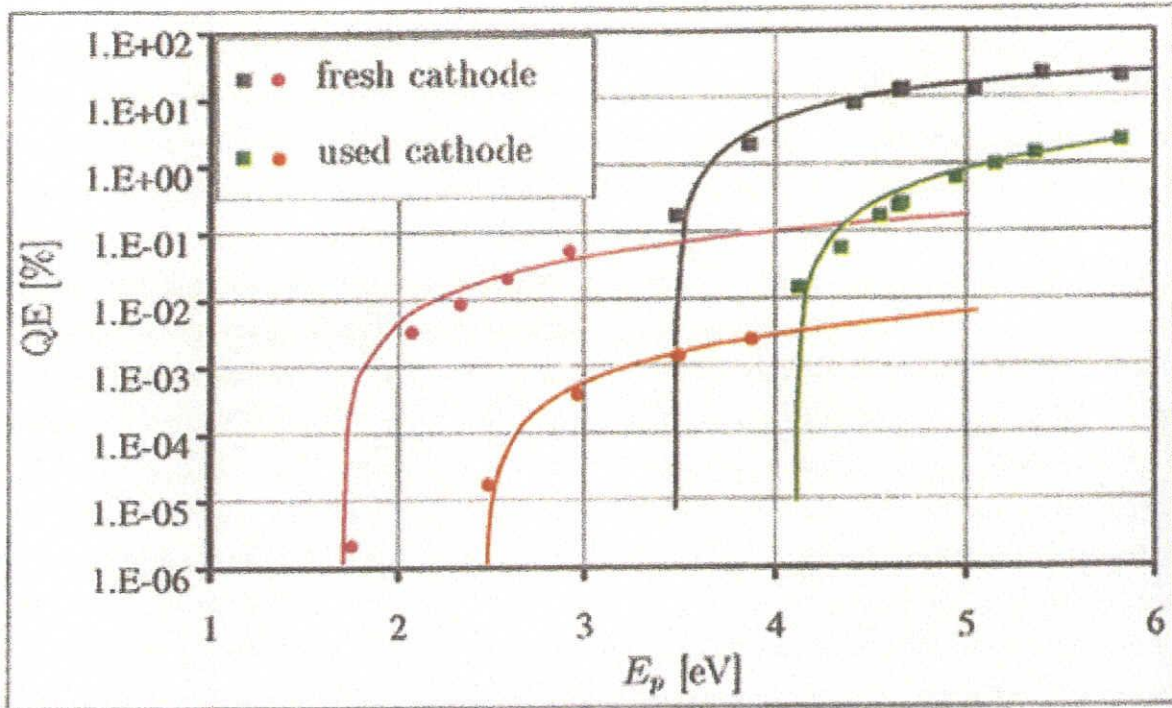


Figure 6.8: CLIC 実験でのセシウムテルライド薄膜フォトカソードの量子効率。量子効率が高い方が薄膜作製直後、低い方が高周波電子銃に装着し電子引き出しを行った後。[25]より転載。図中の曲線は Spice モデル [19] を使った計算値。

材料	$n @ 250\text{nm}$	$k @ 250\text{nm}$
タングステン	3.40	2.85
銅	1.47	1.78

Table 6.1: タングステン、銅の光学定数 [24]

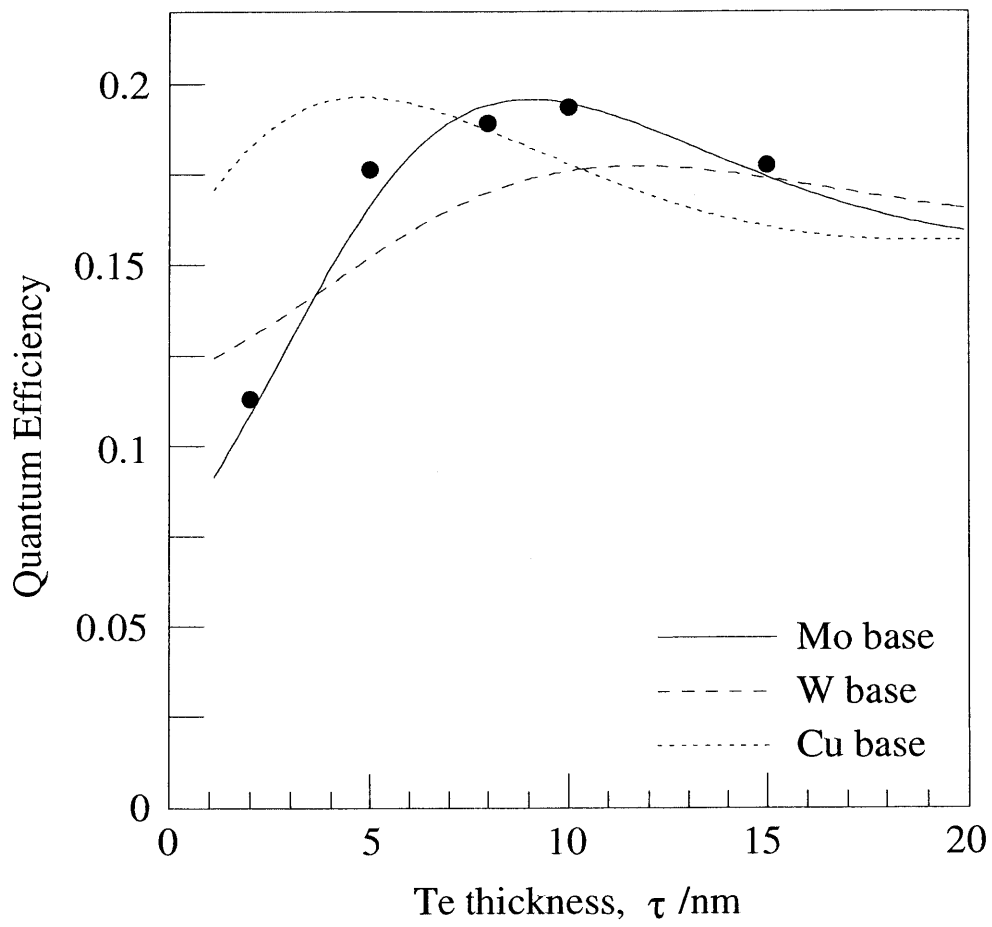


Figure 6.9: 光電子放出モデルを用いた基板依存の検討

図 6.9に示したモデル計算値では、テルル膜厚が 10nm のとき、セシウムテルライド薄膜の基板として、モリブデンが最も高い量子効率を示すことを説明できる。しかし、タングステンと銅を基板として用いた場合のモデル計算値については、テルル膜厚が 10nm のとき、セシウムテルライド薄膜の量子効率がほぼ同等であることを予想している。これは図 6.1に示した測定結果と異なる。このモデル計算では、タングステンと銅を基板に用いた場合については、説明できない。この原因として次のことが考えられる。

1. 今回モデル計算に使用した基板の光学定数は、使用した基板の反射率を直接測定して出した値ではないことが挙げられる。表面粗さや表面の酸化膜の状態などにより、金属の反射率は変化する。今回使用した基板は、加熱処理した以外は酸化膜の除去などの表面処理を行っていない。そのため用いた光学定数が適切でないことが考えられる。
2. 他の原因としては、テルル膜厚の誤差が挙げられる。図 6.1に示した測定結果に示したタングステンと銅を基板に用いたサンプルは、セシウムテルライド薄膜を作製時のテルル蒸着源とサンプルの位置が近く、テルル膜厚の誤差が大きい。テルル膜厚のキャリブレーション (3.1.2の図 3.6) から予測できる誤差は 10 倍を超えている。モデル計算が正しいと仮定すると、銅基板を用いたサンプルでの量子効率測定箇所は、テルル膜厚が 10nm より大きかったことが予想できる。

銅基板を用いた場合、テルル膜厚が 5nm 付近にセシウムテルライド薄膜の量子効率のピークが予想でき、さらなる研究が必要である。

3. そもそも、異なる基板上に作製したセシウムテルライド薄膜の特性が同一でない場合も考えなければならない。図 3.14に示したように、セシウムテルライドは様々な組成比を取る。組成比の異なるセシウムテルライドの特性が同じであるかどうかはまだわかっておらず、また、組成比を含めるセシウムテルライドの特性が、作製する基板に依存するかどうかはわかっていない。
4. 本研究のモデルを用いて見積もったセシウムテルライドの光学定数の不定性が効いていることは否めない。表 4.1と表 5.1にセシウムテルライドの光学定数として示した値には、大きな不定性がある。

正確なセシウムテルライドの光学定数は、例えば偏光解析器などの手段を用いると測定できる可能性が高い。しかしセシウムテルライド薄膜は大気に触れると破損するため、薄膜作製チェンバーに、偏光解析器を組み合わせたシステムが必要である。本研究でセシウムテルライドの光学定数を測定するためには、大幅な実験装置の改造を伴うため、かなり難しいのが現状である。

しかし 3 や 4 に挙げた不都合はあるにしても、本研究のモデルを用いた計算では、大まかな傾向はつかめており、他の基板材料を用いた場合に、量子効率が最大値をとる膜厚の大まかな予測が可能であると言える。薄膜による光の干渉の効果が大きく出る基板材料の予測も可能であり、基板材料の選択においてもこのモデルを用いることは有用であると言える。

Chapter 7

まとめ

本論文では高周波電子銃用のセシウムテルライド薄膜フォトカソードの作製と特性の研究について述べた。セシウムテルライド薄膜は蒸着条件により、フォトカソードとして特性の異なるものができる。入射加速器の高周波電子銃として長時間安定に強力な電子ビームを供給するためには、フォトカソードの量子効率が高かつ時間的に安定であることと、フォトカソード作製の再現性が保たれることが非常に重要な要素である。フォトカソード高周波電子銃はレーザー光を入射する方法として、カソード表面に対してレーザー光を垂直に入射する直入射と、斜めから直線偏光を入射する斜入射がある。光の入射方法として斜入射を採用した場合、セシウムテルライド薄膜フォトカソードの蒸着条件などによる不安定性が強調されることが懸念される。斜入射について詳しく調べることができ、また安定に繰り返し同じ品質のセシウムテルライド薄膜を作製する条件を調べるための実験装置を開発し研究を行った。

安定に量子効率を保つことができるセシウムテルライド薄膜の作製方法について詳しく研究した。とくにセシウムテルライド薄膜の作製において、セシウムの蒸着条件は量子効率の安定性や寿命に大きく寄与することを述べた。テルル、セシウムの蒸着条件が異なるセシウムテルライド薄膜を作製し、量子効率の入射光エネルギー依存性、入射光角度依存性について詳しく調べた。入射光エネルギー依存性については、高周波電子銃として実際に使用する際に使われる光源の領域付近である 5eV 程度の領域では量子効率は約 0.2 と高く、テルル、セシウムの異なる蒸着条件に対する量子効率は 10% から 20% の変動の範囲内にあることを実験結果を示し述べた。4.0eV 以下では蒸着条件によっては 1 桁程度も異なる値を観測した。

直線偏光を用いて量子効率の入射光角度依存性を系統的に測定した。入射光波長 250nm、275nm、300nm について測定した。直入射、入射角度 0° 以外の全ての入射角度で、P 偏光入射時の量子効率は S 偏光入射時の量子効率を上回っており、P 偏光入射時で入射角度が 60° から 70° に量子効率の最大値を観測した。P 偏光入射角度 60° の量子効率は、測定した 3 種類のテルル膜厚でいずれも直入射のときの量子効率に対して 10% から 20% 高い。セシウムテルライド薄膜の膜厚を超える表面粗さを持つ基板を用いてもなおこの特性は保たれている。この測定で、セシウムテルライド薄膜をフォトカソードとして用いた電子銃では量子効率の観点からは P 偏光斜入射を採用することが有利であることを

示した。

セシウムテルライド薄膜からの光電子放出は、基板金属表面上に作製したセシウムテルライド単層薄膜からの光電効果とするモデルを用いて考察を行った。反射率 R は入射光の波長、入射角度、薄膜の膜厚基板材料に依存するものである。今回の実験結果はこのモデルでよく説明できることを示した。

セシウムテルライド薄膜の量子効率の膜厚依存性について詳しく研究した。テルル膜厚が 10nm 前後のサンプルで、量子効率は最大値を取り、それを上回る膜厚のとき、あるいは下回る膜厚のとき量子効率が低下することを実験データを示し述べた。また量子効率の入射光エネルギー依存性についての考察を行い、閾値エネルギーを下回る領域では基板からの光電子放出が主に寄与していること、また閾値エネルギーを上回る領域ではセシウムテルライド薄膜からの光電子放出が主に寄与していることを実験結果を示し推察した。

セシウムテルライド薄膜を作製する基板についての研究を行った。セシウムテルライド薄膜の量子効率は基板に依存することを実験結果を示し述べた。高周波電子銃用のフォトカソードとしてセシウムテルライド薄膜を採用する場合、その基板は薄膜作製と加熱などによる薄膜の除去を繰り返す。この繰り返し使用により今回用いたモリブデン基板は劣化することを述べた。基板の劣化が進むにつれセシウムテルライド薄膜の量子効率は次第に低下する。基板によっては作製されるセシウムテルライド薄膜の組成や構造が変化することも予想され、今後の課題となるものである。

Appendix A

セシウムテルライド 薄膜の組成比

本研究で作製したサンプルを XMA による質量分析を試みた¹。分析を試みたサンプルは真空チェンバー内で作製し、大気に取り出したものである。テルルの膜厚は 10nm、セシウムの蒸着条件は蒸着電流が 5.5A の過剰蒸着であるサンプルについて分析を試みた。本研究においてはセシウムテルライド薄膜は、テルル膜厚が 10nm のとき鮮やかな青色を示すが大気に触れると薄膜は破損し、青色は消える。大気に取り出すと薄膜が破損するため直接質量を分析することはできなかった。

破損したセシウムテルライド薄膜の SEM 写真を図 A.1 に示す。SEM 写真から、破損した薄膜は縮み凝集することがわかる。薄膜が凝集している箇所 (図 A.1 で白く写っている箇所) と、基板が露出していると予想される箇所 (図 A.1 で黒く写っている箇所) の質量分析結果を図 A.2 と図 A.3 に示す。白く写った箇所の質量分析では、セシウムとテルルの質量比 (元素濃度比) はほぼ 2 : 1 であった。黒く写った箇所ではセシウムとテルルはほぼ検出されていない。酸素の質量が白く写った箇所と黒く写った箇所とで 2 倍以上異なることから、薄膜は酸化により破損したものであることが予想される。

¹名古屋大学全学技術センターの五藤 俊明氏にご協力頂きました

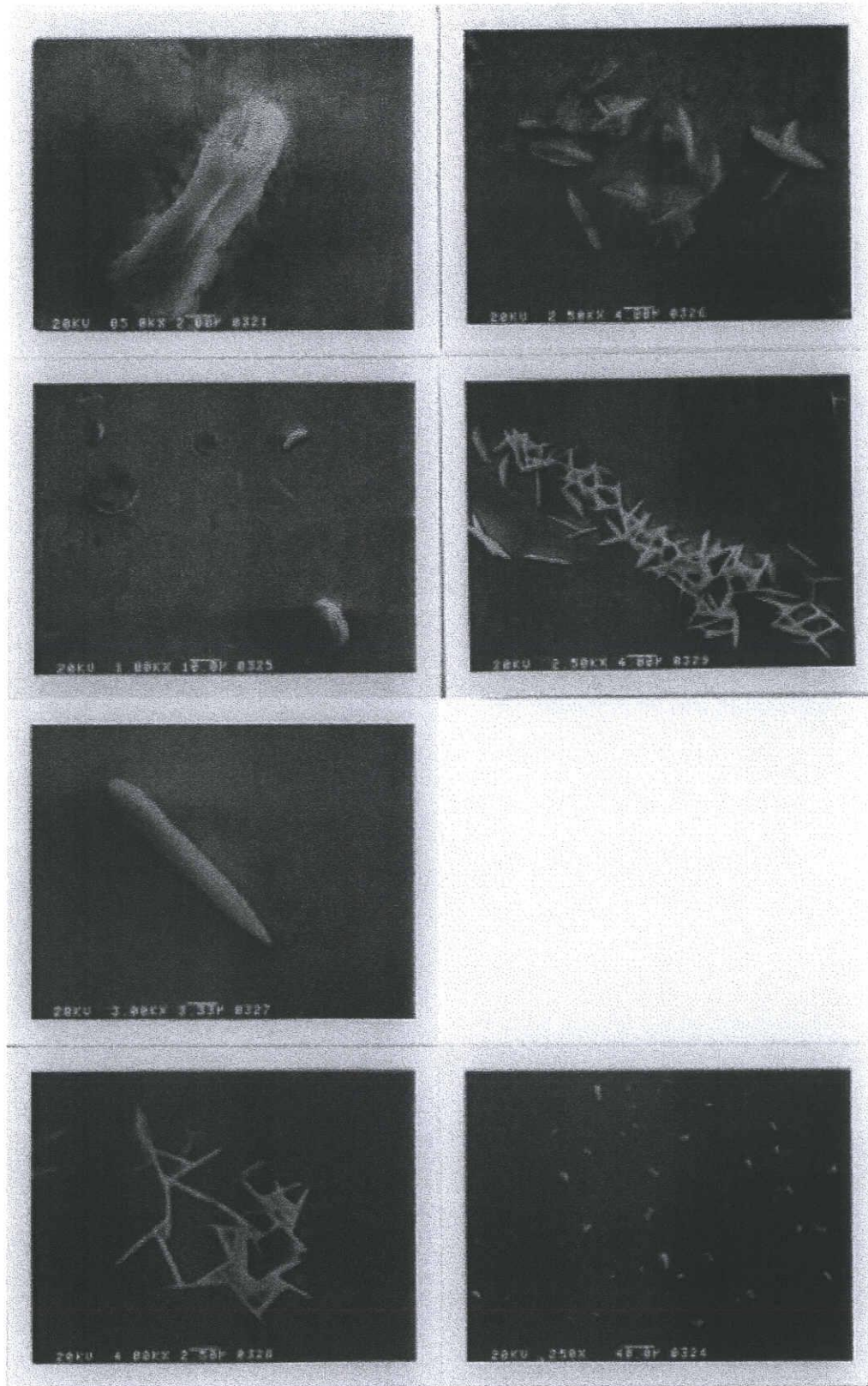


Figure A.1: 破損されたセシウムテルライド薄膜の SEM 写真。質量分析結果から、白く写っている箇所は破損された薄膜が縮み凝集していると予想される部分で、黒く写っている箇所は基板が露出していると予想される。

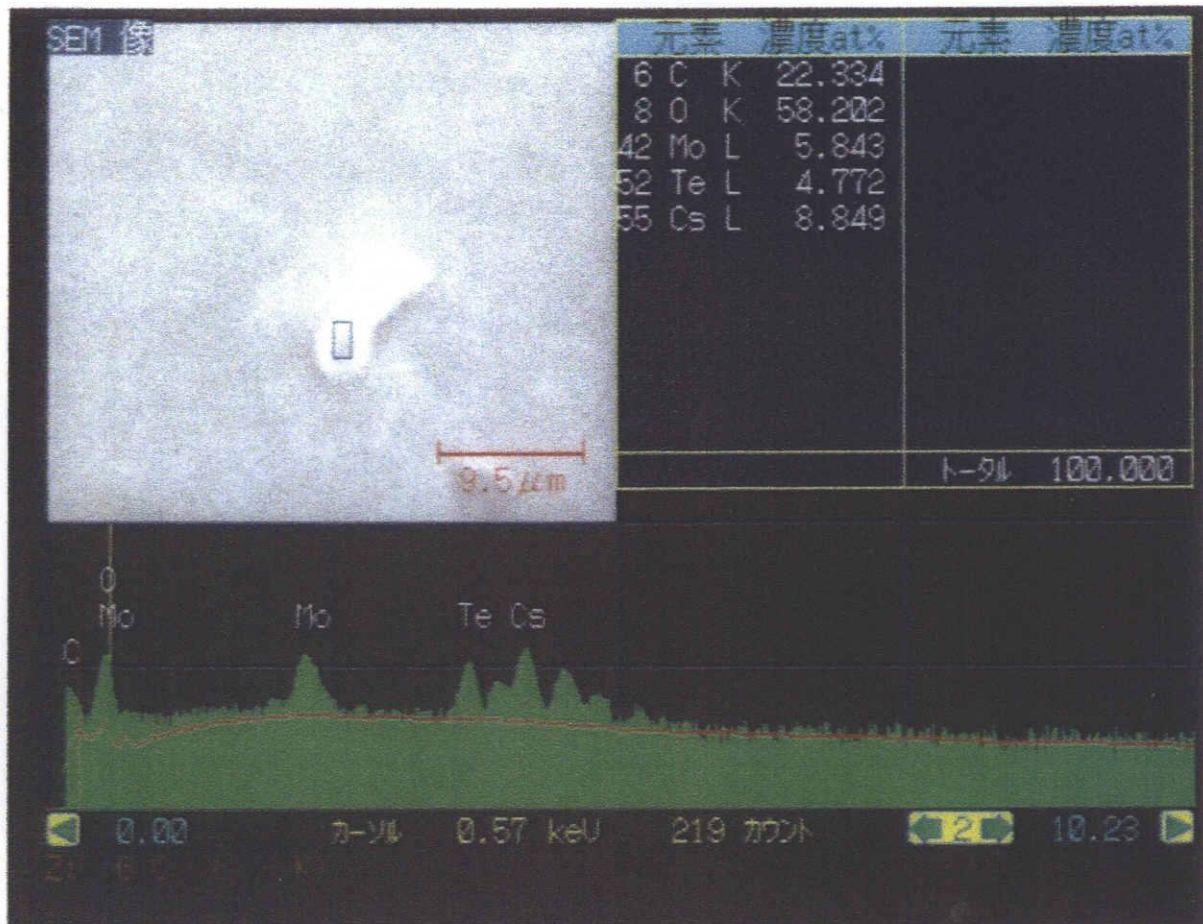


Figure A.2: SEM 写真で、白く写っている箇所の質量分析結果。質量分析結果から薄膜が破損され凝集している部分と予想できる。酸素の濃度が高いことから、薄膜は酸化により破損したと考えられる。

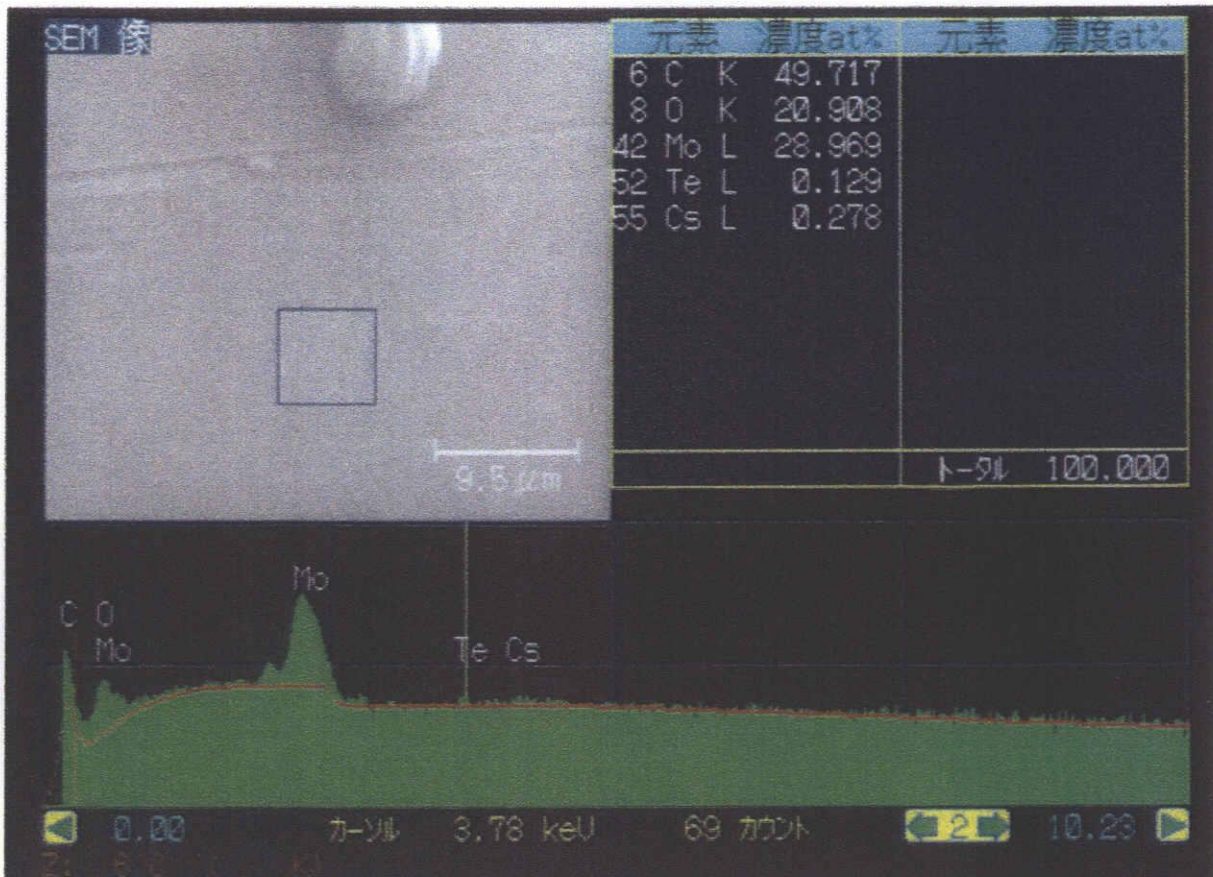


Figure A.3: SEM 写真で、黒く写っている箇所の質量分析結果。質量分析結果から基板が露出している部分と予想できる。

Bibliography

- [1] GLC Group, GLC Project Report, KEK-Réport, 2003-7
- [2] Study Report on the Future Light Source at Photon Factory, KEK , 2003
- [3] NSSR Homepage, <http://nssr.xtal.nagoya-u.ac.jp/>
- [4] D. Bisero, B. M. Vanoerle, G. J. Ernst, J. W. J. Verschuur , W. J. Witteman, Nucl. Ins. Meth. A, 407, 311, 1998
- [5] G. Suberlucq, CLIC Note, 299, 1996
- [6] G. B.Fisher, W. E. Spicer, P. C. McKernan, V. F. Pereskok, S. J. Wanner, Appl., Opt., 12(4), 799, 1973
- [7] S. M. Johnson. Jr., Appl. Opt., 31(13), 2332, 1992
- [8] S. H. Kong, J. Kinross-Wright, D. C. Nguyen, R. L. Sheffield, J. Appl. Phys. 77(11), 6031, 1995
- [9] D. Sertore, S. Schreiber, K. Floettmann, F. Stephan , K. Zapfe, P. Michelato, Nucl. Ins. Meth. A, 445, 422, 2000
- [10] E. Chevallay, G. Suberlucq, H. Trautner, , CTF3. Note, 020. Tech. Photocathode, 2001
- [11] N. Terunuma, K. Hasegawa, M. Kuriki, H. Hayano, J. Urakawa, T. Nakanishi, S. Okumi, I. Sakai, M. Takano, M. Nomura, K. Hirano, Y. Yamazaki, R. Kuroda, M. Washio, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, 162, 2003
- [12] M. Kuriki, J. Urakawa, P. Karataev, N. Terunuma , H. Hayano, K. Hirano, Y. Yamazaki, S. Okumi, T. Nakanishi, M. Yamamoto , M. Takano, K. Hasegawa, Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, 356, 2004

- [13] 広瀬 友規, セシウムテルライドフォトカソードを用いた高周波電子銃による先端加速器用電子ビームの生成, 名古屋大学大学院理学研究科, 修士論文, 2003
- [14] E. Taft, L. Apker, *J. Opt. Soc. America*, 43(2), 81, 1953
- [15] R. A. Powell, W. E. Spicer, G. B. Fisher, P. Gregpry, *Phys. Rev*, B8, 3987, 1973
- [16] E. A. Brandes, G. B. Brook, *Smithells Metals, Reference Book*, seventh edition, Butterworth-Heinemann, 1992
- [17] 鷺尾方一, *日本物理学会誌*, 55(3), 196, 2000
- [18] H. Tomizawa, H. Dewa, T. Taniuchi, A. Mizuno, , T. Asaka, K. Yanagida, S. Suzuki, T. Kobayashi, H. Hanaki, , *Proceedings of EPAC 2002*, Paris, France, 1819, 2002
- [19] W. E. Spicer, *Phys. Rev*, 112, No1, 114, 1958
- [20] K. Floettmann, Note on thermal emittance of electrons emitted by Cesium Telluride photo cathodes, TESLA Internal Report.
- [21] G. Ferrini, P. Michelato, F. Parmigiani, *Solid State Communications*, 106(1), 21, 1998 ; A. di Bona, F. Sabari, *J. Appl. Phys.*, 80(5), 3024, 1996
- [22] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, Seventh Edition, Cambridge University Press, 1999
- [23] P. Michelato, C. Pagani, D. Sertore, A. di Bona, S. Valeri, *Nucl. Ins. Meth. A*, 393, 464, 1997
- [24] E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, Inc. 1985
- [25] H. Trautner, PhD. Thesis, CLIC Note 428, 2000
- [26] E. Chevally, J. Durand, S. Hutchins, G. Suberlucq , H. Trautner, CERN-PS-98-036-LP, 1998
- [27] H. Dewa, J. Sasabe, T. Asaka, T. Kobayashi, S. Suzuki, T. Taniuchi, H. Tomizawa, A. Mizuno, K. Yanagida, , H. Hanaki, M. Uesaka , *Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan*, 171, 2003
- [28] J. Sasabe, H. Hanaki, T. Asaka, H. Dewa, T. Kobayashi, A. Mizuno, S. Suzuki, T. Taniuchi, H. Tomizawa, K. Yanagida, M. Uesaka, *Nucl. Ins. Meth. A*, 528, 382, 2004
- [29] H. B. Michaelson, *J. Appl. Phys.*, 48(11), 4729, 1977

論文目録

学会誌・雑誌等

※ 3. 5. 6 は本論文中で述べている。

1. "Measurement of the jet width in $\gamma\gamma$ collisions and in e^+e^- annihilation process at TRISTAN", K. Adachi, H. Hayashii, K. Miyabayashi, S. Noguchi, A. Miyamoto, T. Tauchi, K. Abe, T. Abe, I. Adachi, M. Aoki, M.Aoki, R. Enomoto, K.Emi, H. Fujii, K. Fujii, T. Fujii, J. Fujimoto, N. Fujiwara, H. Hirano, B. Howell, N. Iida, H. Ikeda, Y. Inoue, S. Itami, R. Itoh, H. Iwasaki, M. Iwasaki, R. Kajikawa, K. Kaneyuki, S. Kato, S. Kawabata, H. Kichimi, M. Kobayashi, D. Koltick, I. Levine, S. Mamada, K. Muramatsu, K. Nagai, K. Nakabayashi, M. Nakamura, E. Nakano, O. Nitoh, A.Ochi, F. Ochiai, N. Ohishi, Y. Ohnishi, Y. Ohshima, H. Okuno, T. Okusawa, E. Shibata, A. Sugiyama, H. Sugiyama, S. Suzuki, K. Takahashi, T. Takahashi, T. Tanimori, Y. Teramoto, M. Tomoto, T. Tsukamoto, T. Tsumura, S. Uno, Y. Watanabe, A. Yamamoto, M. Yamauchi ; Physics Letters B451, p-p 256-266, 1999
2. "Beam loss in an electron storage ring", H. Kobayakawa, Y. Takashima, H. Sugiyama, S. Kuwayama, M. Yamakage ; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 投稿中
3. "Characteristics of Cesium Telluride Films for Oblique Incidence Type Photocathodes", H. Sugiyama, H. Kobayakawa, Y. Takashima, T. Nakanishi, S. Okumi, F.Furuta, K. Naniwa ; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 投稿中
4. "Estimation of effective dose caused by stray radiations of photons, electrons and positrons around a small storage ring for a synchrotron radiation facility", Y. Takashima, S. Oki, H. Sugiyama, H. Kobayakawa ; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A , 掲載決定
5. "セシウムテルライド 薄膜フォトカソードの量子効率の膜厚依存性", 杉山 陽栄, 小早川 久, 竹田 美和, 高嶋 圭史, 浪花 健一 ; 日本金属学会誌, 掲載決定
6. "セシウムテルライド 薄膜フォトカソードの量子効率の基板依存性", 杉山 陽栄, 小早川 久, 竹田 美和, 高嶋 圭史, 浪花 健一 ; 日本金属学会誌, 投稿中

国際会議

1. "Test of Cesium Telluride Photocathode as a Feasibility Study on Polarized RF-Gun", F. Furuta, H. Sugiyama, T. Nakanishi, S. Okumi, K. Togawa, C. Suzuki, K. Wada, M. Yamamoto, T. Nishitani, J. Watanabe, S. Kurahashi, M. Miyamoto, M. Kuwahara, R. Mizuno, T. Hirose, K. Kimura, H. Kobayakawa, Y. Takashima, M. Yoshioka, H. Matsumoto; The 14th International Workshop on Polarized Electron Sources and Polarimeters(PES2000), October 12-14, 2000, Nagoya, Japan, SPIN2000 Proceedings, pp. 1015-1017

その他

1. "2光子過程における Prompt 光子生成反応の研究", 林井 久樹, 杉山 陽榮, 足立 和子, 宮本 彰也, 他 TOPAZ Collaboration; 日本物理学会第 54 回年会, 1999 年 3 月 28 日~31 日, 広島大学 東広島キャンパス
2. "Feasibility Study on Polarized RF-gun Test of Cesium Telluride Photocathode", F. Furuta, T. Nakanishi, S. Okumi, K. Togawa, C. Suzuki, S. Nakamura, K. Wada, M. Yamamoto, T. Nishitani, K. Kimura, H. Sugiyama, H. Kobayakawa, Y. Takashima, M. Yoshioka, H. Matsumoto; Proceedings of the 24th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 7-9, 1999, Sapporo, Japan, pp. 173-175
3. "RF-gun 用 Cs₂Te 半導体フォトカソードの開発", F. Furuta, T. Nakanishi, S. Okumi, K. Togawa, C. Suzuki, K. Wada, M. Yamamoto, T. Nishitani, K. Kimura, H. Sugiyama, H. Kobayakawa, Y. Takashima, M. Yoshioka, H. Matsumoto; Workshop on Beam Physics 1999, November 15-17, 1999, Spring-8, Hyogo, Japan, pp. 395-408
4. "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 陽榮, 古田 史生, 木村 健一, 小早川 久, 高嶋 圭史, 中西 彊, 奥見 正治, 和田 公路, 山本 将博, 西谷 智博, 宮本 延春, 桑原 真人, 山本 尚人, 浪花 健一, 渡辺 修, 守屋 健太; Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 30-August 1, 2003, Tokai, Japan, pp. 105-107
5. "Cs-Te フォトカソード電子源のスピンの偏極度測定計画", 宮本 延春, 浪花 健一, 杉山 陽榮, 古田 史生, 中西 彊, 奥見 正治, 和田 公路, 山本 将博, 西谷 智博, 桑原 真人, 山本 尚人, 高嶋 圭史, 小早川 久; Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 30- August 1, 2003, Tokai, Japan, pp. 144-146
6. "電界放出型フォトカソードを用いるスピンの偏極電子源の開発", 桑原 真人, 中西 彊, 山口 浩一, 三浦 健, 堀中 博道, 奥見 正治, 香月 真澄, 和田 公路, 古田 史生, 西谷 智博, 山本 将博, 杉山 陽榮, 宮本 延春, 山本 尚人, 浪花 健一, 小早川 久; Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, July 30- August 1, 2003, Tokai, Japan, pp. 168-170

7. ”高エネルギー電子と金属多層箔を用いた高輝度 X 線生成の検討”, 高嶋 圭史, 松原 匡秀, 杉山 陽栄, 小早川 久; 第 17 回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム, 2004 年 1 月 8 日~10 日, つくば国際会議場
8. ”Cs-Te のカソード材としての特性”, 杉山 陽栄, 古田 史生, 木村 健一, 小早川 久, 高嶋 圭史, 中西 彊, 奥見 正治, 山本 将博, 西谷 智博, 桑原 真人, 山本 尚人, 浪花 健一; 第 1 回 高周波電子銃研究会, 2004 年 1 月 29 日~30 日, 高エネルギー加速器研究機構
9. ”金属多層箔を用いた高輝度 X 線源の研究”, 高嶋 圭史, 中堀 一孝, 杉山 陽栄, 小早川 久; 第 18 回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム, 2005 年 1 月 7 日~9 日, サンメッセ鳥栖
10. ”小型放射光施設における放射線空間分布の計算と放射線遮蔽”, 高嶋 圭史, 杉山 陽栄, 小早川 久; 第 18 回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム, 2005 年 1 月 7 日~9 日, サンメッセ鳥栖

謝辞

名古屋大学におけるセシウムテルライド薄膜フォトカソードの研究のオリジナルメンバーは、名古屋大学工学研究科教授(当時)小早川久先生、名古屋大学理学研究科教授の中西彊先生、名古屋大学全学技術センターの奥見正治先生、名古屋大学工学研究科助手の高嶋圭史先生と、名古屋大学理学研究科博士課程後期課程(当時)の古田史生氏と名古屋大学工学研究科博士課程前期課程(当時)の木村健一氏をはじめとする方々です。

この論文を作成するにあたり多くの先生方からのご指導、ご協力を頂きました。ご指導、ご協力を頂いた先生方に深く感謝致しております。名古屋大学名誉教授の小早川久先生には、退官されるまでの4年間指導教官として指導して頂きました。退官後も論文作成について議論をして頂きました。

名古屋大学工学研究科教授の竹田美和先生に感謝しております。竹田美和先生にはこの論文の作成を指導して頂きました。また、私が名古屋大学大学院博士課程後期課程に入学してからの6年間、実験や研究についてご教授頂きました。実験研究者として、人としての姿勢も学ばせて頂きました。ありがとうございます。

名古屋大学工学研究科教授の篠田剛先生に感謝しております。小早川久先生の退官後、指導教官を引き受けて頂きました。ありがとうございます。篠田研の名古屋大学工学研究科博士課程前期の桑野智氏に基板の表面粗さの測定を行って頂きました。ありがとうございます。

高エネルギー加速器研究機構教授の前沢秀樹先生と反射の理論についての議論を行いました。本研究で考察したセシウムテルライド薄膜の光電子放出のモデルにおいて、反射の理論は根幹を成すものです。感謝しております。

名古屋大学全学技術センターの五藤俊明先生にはテルル膜厚測定のカリブレーション、SEMを用いた質量分析にご協力頂きました。また、小早川久先生の退官にともなう理学部物理学科への実験装置の移動後、日常的に実験室における安全確認を行って頂きました。事故なく実験を進めてさせて頂いたことを心から感謝しております。

名古屋大学理学研究科助手の山本将博先生には光強度計を製作して頂きました。ありがとうございます。

名古屋大学技術センターの香月真澄先生、名古屋大学理学部物理学科4年生の酒井良介氏に、モリブデン基板の切削にご協力頂きました。ありがとうございます。

一緒に実験を行い、議論を行い、研究を共有した学生のみなさんにも感謝しております。古田史生氏、木村健一氏には、何も知らなかった名古屋大学大学院博士課程後期課程入学当時の私に真空生成、基本的なセシウムテルライド薄膜の生成方法などを直接教えて頂きました。入学後2年に渡り実験現場をともにしました。木村健一氏とは本研究に用い

た実験装置の開発を一緒に行いました。ありがとうございます。

名古屋大学理学研究科博士課程前期課程の浪花健一氏とは、理学部物理学科への実験装置の移動後の2年間、実験や議論での交流がありました。この論文に掲載した多くの実験データの測定と、真空生成を手伝って頂きました。ありがとうございます。

この他多くの学生のみなさんと苦楽をともにさせて頂きました。ありがとうございます。