

CsKTe 薄膜による GaAs の NEA 活性化

A STUDY OF NEA ACTIVATION OF GaAs WITH CsKTe

正木一成, 栗木雅夫,
Kazunari Masaki, Masao Kuriki
Hiroshima University

Abstract

The spin polarized electron beam plays an important role in International Linear Collider (ILC). In present, only the GaAs/GaAsP super-lattice can generate 90% polarized electrons. Negative Electron Affinity (NEA) surface state is necessary to emit spin polarized electrons. The NEA surface is fabricated by adsorption of Cesium and Oxide or NF₃ to the GaAs's surface. By this method, NEA-GaAs cathode has over 1.5% quantum efficiency with 90% polarization. On the other hand, the surface is sensitive to residual gas adsorption, etc., and it requires ultra-high vacuum less than 1.0×10^{-9} Pa to maintain the electron emission. Due to this limitation, the cathode is not compatible to RF gun. If the NEA cathode can be used in RF gun, there are many merits. We studied alternative method to fabricate robust NEA surface on GaAs cathode based on hetero-junction model. We formed CsKTe thin film on GaAs surface and observed a significant photon emission at the GaAs's band gap energy. We report the detail of our experiments.

1. 序論

スピン偏極は粒子にとって基本的な量子数であり、また磁気と相互作用をするという特徴をもっている。そのため、素粒子実験や、磁気現象の観測、スピントロニクスにおいて重要な役割を担っている。International Linear Collider (ILC)では、偏極電子ビームを用いることで、実質的なルミノシティが増大するとともに、余分な反応を減少させ、新物理への新たなチャンネルが開かれるなど、大きな役割を担っている。偏極電子を GaAs カソードから発生させる方法は、1975年にD.T. Pierceによって実現され、偏極度45%が実現されている[1]。その後、名古屋大学のグループにより歪みカソード[2]、歪み超格子カソード[3]が開発され、偏極度92%が実現されている。また、X.G. Jinらは歪み補償型超格子カソードを開発し、90%という高い偏極度と1.6%という高い量子効率の両立を実現している[4]。このように、今までGaAsからの発生する偏極電子ビームの性能は大きく向上してきているが、その電子ビーム放出特性が残留ガスなどの汚染によって容易に失われるという脆弱性の改善については、大きな進展がみられない。脆弱性の大きな原因は、偏極電子の生成に必要なNEA(Negative Electron Affinity)と呼ばれる特殊な表面にある。NEAとは真空のエネルギー準位が伝導帯の最低準位を下回った表面状態である。通常NEA表面を作成するには、清浄化したGaAs表面にCsとOもしくはNF₃を吸着させる。NEA表面の耐久性は限定的であることが知られており、Csの熱脱離、残留ガスの吸着、Ion Back Bombardment (IBB)などで容易に劣化する。そのため、NEA-GaAsを運用するには真空圧力 1×10^{-9} Paを下回る極高真空状態を保つ必要がある。もしNEA-GaAsの脆弱性が改善でき、容器内を極高真空状態に保つ必要がなくなれば、RF電子銃での使用が可能となる。そのため今までGaAsの運用上必要だった複雑なバンチングセクションの大

幅な簡素化が可能となる。よって技術的・コスト的なハードルが下がり、GaAsカソードの適用可能性が大幅に広がる。このように偏極電子ビームの利用が大きく広がることで、科学の発展に大いに寄与することができる。

本研究においては、ヘテロ接合モデルに基づいたNEA-GaAsカソードの高耐久化を提案する。この方法を模式的に表したエネルギーバンド図をFig. 1に示す。横軸は左からp型GaAs、薄膜半導体、真空の各領域を表しており、縦軸はエネルギーを表す。この方法においては、p型GaAsの表面に安定半導体薄膜を成膜し、両者のバンド構造の差を利用することで実効的にNEA表面状態を作り出す。薄膜として用いる半導体の条件は3つある。1つ目はGaAsのバンドギャップよりも薄膜半導体の仕事関数が小さいこと($E_{BG(GaAs)} > \phi$)である。これを満たすことでFig. 1に示すように実効的にNEAとなる。2つ目はGaAsのバンドギャップよりも薄膜半導体のバンドギャップが大きいこと($E_{BG(GaAs)} < E_{BG(film)}$)である。これを満たすことで、入射光が薄膜を透過し、GaAsから偏極電子の励起が可能となる。3つ目は耐久性が高い

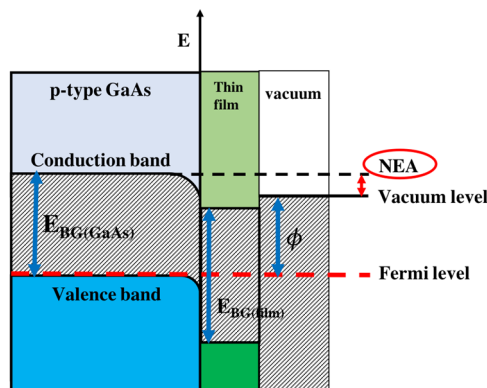


Figure 1: This graph of the band diagram shows NEA activation based on hetero-junction model with a thin film of semiconductor.

ことである。表面に薄膜として存在する半導体の耐久性が高ければ、残留ガスの影響に対して堅牢な NEA 表面が作成できる。

上記の条件を満たす薄膜として CsTe 薄膜が存在する[5]。CsTe は耐久性が高く、RF 電子銃での運用も可能な半導体である。この薄膜を用いた NEA 活性化研究が広島大学とコーネル大学で行われた[6, 7]。その結果、CsTe によって GaAs が NEA 活性化されると示唆される結果が得られ、またスピン偏極した電子の放出が確認された。しかし耐久性は不十分であり、課題が残る結果となった。

そこで今回我々は CsTe 薄膜に代わる薄膜として Cs-K-Te 薄膜を選定し、NEA 活性化実験を行った。Cs-K-Te のバンド構造の詳細については判明していないため、NEA 活性化条件を満たすかどうかは不明である。しかし CsKTe は CsTe と同様に Cs と Te の化合物による半導体であり、かつ Fig. 2 に示すように光電子の放出閾値が 3.5~4.0 eV であることや、量子効率が 20%程度であるなど、CsTe と似た性質を持っている。そのため NEA 活性化の可能性を予想し、実験を行った。

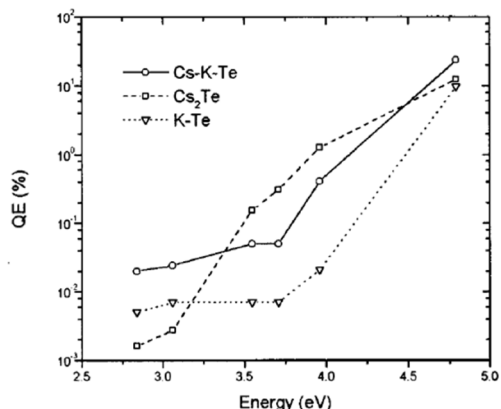


Figure 2: This graph shows Q.E. spectrum of Cs-K-Te, Cs₂Te and K-Te photocathodes [8].

2. 実験装置

今回実験に用いた装置を Fig. 3 に示す。この装置は薄膜の成膜および光電流測定を単一の真空容器内で行うことが可能である。真空容器はイオンポンプ (160l/s) と NEG ポンプ (310l/s) によって 1.5×10^{-8} Pa 以下の真空圧力に保たれている。

試料は Zn をドープした p 型 GaAs (100) を用いており、カードリッジヒーターを内蔵した Mo ヘッド上にインジウムで接着してある。GaAs 表面には化学洗浄を施し、さらに成膜試験前に加熱洗浄を施すことによって表面の清浄化を行なっている。

蒸着源には SAES-Getters 製の alkali-metal dispenser を用いており、Te は W ヒーターによって蒸散させている。成膜時、設置した水晶振動子にも同時に蒸着を行うことによって GaAs 上の膜厚をモニターしている。

今回用いた光学系を Fig. 4 に示す。光源に 150W の

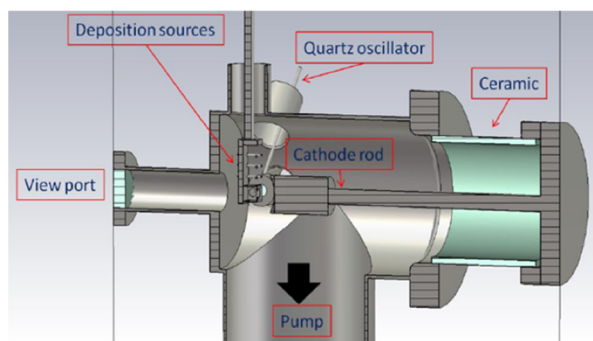


Figure 3: A schematic drawing of experimental equipment in Hiroshima University.

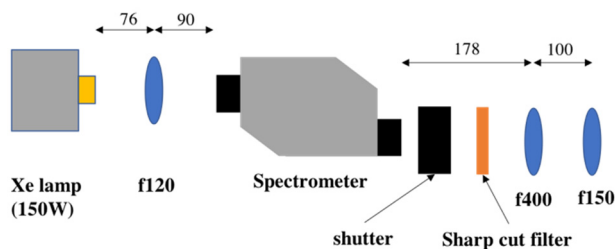


Figure 4: A schematic drawing of the optical system.

Xe ランプを使用しており、3 つの平凸レンズによって 10×4 mm の長方形に収束している。光は分光器によって各波長に分光している。本試験では 250 ~ 1000nm の波長領域を 10nm 刻みで分光しており、それぞれの波長で 60 回光電流を測定している。また、500nm 以上の波長領域ではシャープカットフィルターを挿入しており、高調波成分を遮断し、量子効率の波長依存性を正確に測定できる。

3. 成膜方法

GaAs 表面に薄膜を形成する際、最適な条件を調べるため、本試験では各々の膜の厚みをパラメータとした。そのほかの蒸着条件を一定とするため、制御可能な範囲内で成膜速度は Te の場合は 0.1 \AA/s 、K と Cs の場合は 0.01 \AA/s とした。

まずあらかじめ決めた膜厚量の Te を GaAs 上に蒸着する。その後 K と Cs の蒸着を行う。すべての実験において、K と Cs の膜厚を同じとし、K と Cs の蒸着を Te と同じ膜厚で交互に繰り返した。量子効率を計測し、波長 250nm に対する量子効率が最大となったときに蒸着を停止した。

本試験では水晶振動子によって膜厚をモニターしている。GaAs 上の膜厚と膜厚計の測定値を以下のように較正した。本装置で GaAs 基板上に成膜した Te 膜厚の厚みをエリプソメータによって直接測定し、水晶振動子により測定された Te 膜厚と比較した。その結果を Fig. 5 に示す。横軸が水晶振動子で測定した Te 膜厚、縦軸がエリプソメータで測定した Te 膜厚である。直線が較正直線である。今後は Te 膜厚として、この較正值を用いる。

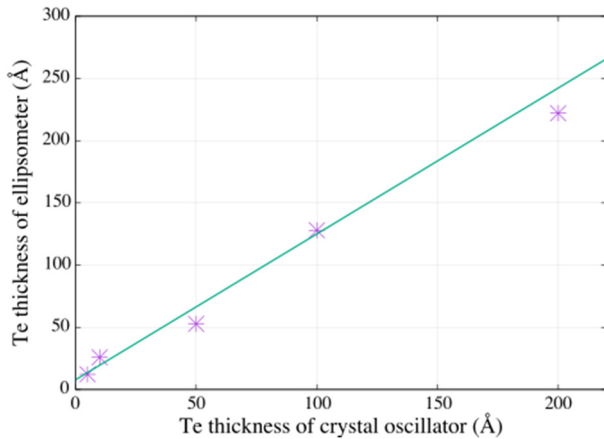


Figure 5: Calibration of Te thickness of crystal oscillator by ellipsometer.

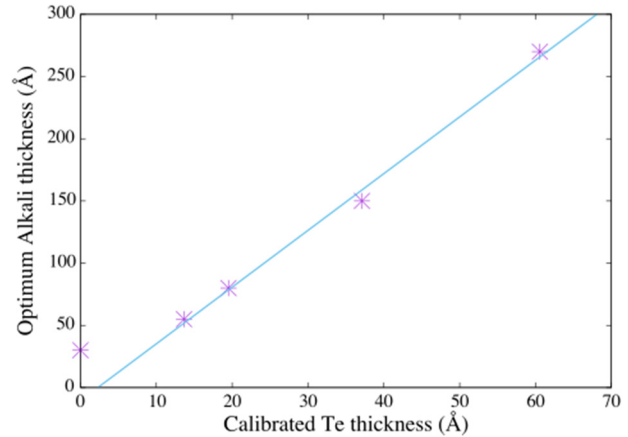


Figure 7: Optimum Alkali-metal thickness in Calibrated Te thickness.

4. 結果と考察

Te の厚みを 13.6□ とし、その後 K と Cs を交互に蒸着して量子効率を測定した結果を Fig. 6 に示す。横軸は入射光のエネルギー、縦軸は量子効率を表す。また異なる記号によって異なる Cs と K の膜厚による結果を表している。以下 Cs と K の膜厚の和を CsK 膜厚とする。CsK 膜厚が増加するにつれて 1.4 ~ 5.0 eV の領域で量子効率が増加している様子が確認できる。また、最適膜厚となった CsK の膜厚が 50Å の結果では、GaAs のバンドギャップエネルギー 1.4 eV 相当の光において光電流値を観測し、 2.5×10^{-5} の有意な量子効率を得た。

この測定を異なる Te 膜厚においても行い、最適膜厚の Te 膜厚依存性について調べた。結果を Fig. 7 に示す。横軸が較正 Te 膜厚、縦軸が波長 250nm の光で量子効率が最大となったときの CsK 膜厚である。Te の膜厚が増加するのに従って CsK 膜厚が増加していることがわかる。これは直線で fitting でき、CsK 膜厚は Te 膜厚に比例することがわかった。Te と Cs, K の膜厚の比が一定であることから、Te と Cs, K が化合物を形成しており、GaAs 表面に CsKTe 薄膜が成膜されたことが推測される。

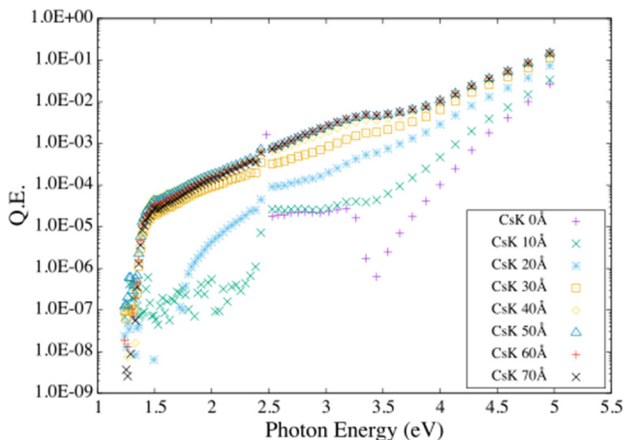


Figure 6: QE spectrum caused by photon energy. This graph color-coded according to CsK thickness in Te thickness 13.6Å.

本試験は室温下 (23□) で行なった。このとき GaAs の価電子帯から伝導帯へ熱的に励起された電子の存在確率をフェルミ分布関数で求めると、 10^{-25} となり、熱による励起は無視できる。よって本試験では CsKTe 薄膜によって GaAs が NEA 活性化されたことが示唆される。

5. まとめ

NEA-GaAs の耐久性の向上のため、我々は今回ヘテロ接合モデルに基づいた CsKTe 薄膜による GaAs の NEA 活性化試験を行なった。実験の結果、GaAs の表面に CsKTe 薄膜を成膜でき、GaAs のバンドギャップに相当する波長 850nm の光において有意な光電流を観測した。また、室温程度の温度であれば GaAs の価電子帯から伝導帯への熱電子の励起確率がほぼ無視できることから、CsKTe 膜によって NEA 活性化されたことが強く示唆される結果を得た。これによって RF 電子銃での使用に耐えうる、強固な NEA 表面が作成できる可能性がある。

参考文献

- [1] D.T. Pierce *et al.*, Appl. Phys. Lett. 26, 670 (1975).
- [2] T. Nakanishi *et al.*, Phys. Lett. A 158 (1991) 345-349.
- [3] T. Nishitani *et al.*, J. Appl. Phys. 97, 094907 (2005).
- [4] N. Yamamoto *et al.*, Proc. PASJ2015 WEP042.
- [5] H. Sugiyama *et al.*, J. Phys. Conf. Ser. 298 (2011) 012014.
- [6] K. Uchida *et al.*, "GaAs フォトカソードの CsTe 薄膜による NEA 活性化の研究".
- [7] J.K. Bae *et al.*, Appl. Phys. Lett. 112, 154101 (2018).
- [8] D. Bisero *et al.*, Appl. Phys. Lett. 70, 1491 (1997).