PASJ2018 FROM04

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 1.0x10⁻⁹ 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 が大きく拡がることで、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, Cs_2Te 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 (1601/s)と NEG ポンプ (3101/s)によって 1.5×10⁻⁸Pa 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10×4mm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 /s、K と Cs の場合は 0.01 /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、この較正値を用いる。

PASJ2018 FROM04



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

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、2.5x10⁻⁵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 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.



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

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、我々は今回へ 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).