

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00951

研究課題名(和文) 中空陰極ランプを用いた仕事関数測定用実験教材の開発とその教育的効果の検証

研究課題名(英文) Development of Experimental Apparatus for Measuring Work Functions Using a Hollow-cathode lamp

研究代表者

大向 隆三 (Ohmukai, Ryuzo)

埼玉大学・教育学部・教授

研究者番号：40359089

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：我々が提案する、中空陰極ランプを光電管として利用する新しい仕事関数測定法で、CsとKの仕事関数を求めることができた。本手法のメリットである汎用性や、実験室内で比較的シンプルな実験配置で仕事関数を求められることも確認できた。我々の実験方法で得られた仕事関数の値は従来の別の研究手法で得られた値と誤差の範囲で一致し、再現性も高かった。本研究で得られた仕事関数の値は十分に信用できる値であることが明らかとなった。ランプの陰極に含まれる元素の影響で、測定対象となる元素の仕事関数の値が変化することも同時に明らかにできた。物理実験教材への活用に向けた有意義な知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究のアイデア、実験原理、研究手法、実験結果は我々のオリジナルな成果で、今までにない仕事関数測定法の原理的実証と物理実験教材への応用に向けた基礎データを得ることができた。実際に元素の仕事関数の値を求め、再現性や精度を評価することができたことは、初めての成果である。これらにより、実験教材への活用にむけて大きく研究が進化したことになり、物理教育研究分野で大きな貢献をできたことに加え、仕事関数の値の精密測定結果として表面物理の分野での新しい研究シーズをもたらすことができた。

研究成果の概要(英文)：We measured work function of Cs and K by using the method that we proposed where we use a hollow-cathode lamp as a phototube. It was confirmed that this method can be used universally and that the work function can be obtained with a relatively simple experimental arrangement in the laboratory, which are the merits of this method. It was also found that the values of the work functions obtained by our experimental method agree with the value obtained by another conventional method within a margin of error. It became clear that the work function values obtained in this study are reproducible and sufficiently reliable from our analysis. At the same time, it was clarified that the work function value of the element to be measured changes due to the influence of other elements contained in the lamp cathode. The useful knowledge was obtained for utilizing our method as a teaching material for physics experiments.

研究分野：物理教育

キーワード：中空陰極ランプ 仕事関数 実験教材

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

情報通信、エレクトロニクスなど、現代の我々の生活には物理学の成果が様々な場面で応用されている。その成果の多くは 20 世紀以降に進展した量子物理の研究成果であるが、高校物理の中でこれらの内容について学ぶ時間は非常に短く、大学では理系以外の学生はほとんど学ぶ機会がない。将来に科学を専門に学ぼうとする高校生や科学の面白さを伝える役割を担う教員養成系学部の大学生を、難解という印象の強い量子物理へスムーズに導入できるようになれば、物理嫌いや理科離れを解消するうえで極めて重要な役割を果たす。応募者は、現勤務機関で約 10 年間物理教育に従事してきたが、文系の大学生や高校理科教員を目指す学生の教育に取り組むなかで、大学で初めて学ぶ量子物理を始めとした現代物理学の内容を授業する際に、効果的かつ適切にその学習内容を示し学生の理解を深めてくれるような実験教材が不足していることを痛切に感じた。実際、量子物理分野の市販の実験教材はそもそも種類が少ないうえに、自動化・ブックボックス化されていて一見してその動作原理を理解するのが困難な教材が多い。

本研究では、このような課題を解決するため、量子物理を学び始める段階で「量子」の考えに始めて直面する機会となる「光電効果」にスポットをあて、光電効果と密接に関連する物理量である「仕事関数」を測定できる実験教材の開発に取り組むこととした。光電効果の現象を観察する実験教材は市販されているが、遮光のためにカバーされていてその仕組みを理解するのは困難である。また、仕事関数の測定は光電子分光や熱電子放出などの大規模・高価な実験技法で行われるのが一般的である。このような現状に対し応募者は、原子吸光分析用光源として用いられる中空陰極ランプ (HCL) を光電管として用い、放電プラズマのインピーダンス変化から光電効果信号を検出するというまったく新しい実験方法を提案し、その原理に基づいて仕事関数を求める研究を進めることとした。このユニークなアプローチを突破口に、高校や大学の授業で活用できる規模・機器構成で、教育的に有効な金属の仕事関数測定教材として完成させることを狙っている。

本研究内容の着手から現在に至るまでに実験で明らかにしてきたことは以下の通りであった。

提案したアイデアに従い、光電効果信号が検出できること

机の上のコンパクトな装置、家庭用コンセントからの電源で信号検出できること

遮光不要で、学生が目で見ながら操作しながら実験できる教材であること

しかし本研究の研究開始時点でまだ次の 3 点を明らかにできておらず、これらの研究を進めることが残された喫緊の課題であった。

教材を使って得られる実験結果から定量的な物理量 (仕事関数) の考察ができること

光電効果の実験教材として汎用性を有すること (金属の種類を変えても同様に仕事関数を測定できる)

この教材を使って実験に取り組んだ結果、学生の光電効果や光の粒子性、仕事関数に関する理解が深まる事実を確認すること

2. 研究の目的

そこで本研究では、上述の残された課題を一気に解決するような実験研究に着手し、高校や大学の物理学実験で活用できる光電効果実験教材の完成と、その実験過程で得られる光電効果の物理学的特性の解明を目的とした。そのために本研究期間内における具体的な研究の到達目標として研究の着手時に以下の 3 項目を設定した。

(1) セシウム (Cs) の仕事関数の精密測定

室温における Cs の限界波長 (640 nm) は金属の限界波長の中でもっとも大きい値である。特徴的なこの Cs の限界波長を、我々の開発した仕事関数測定教材で精密に測定できるようにする。この教材を物理量の精密測定に対して十分な性能を有する教材に仕上げる。さらにこの教材で測定した限界波長の値と上記の値を比較し、物理的な解析を加える。仕事関数の値は様々な物理的条件・環境によって同じ金属種でも大きく変化することが知られており、後者の成果はそのメカニズムに関する知見を得られる可能性がある。このような観点の研究は今までに報告例がないので、本研究成果は表面物理の分野でも学術的な貢献が期待される。

(2) Cs 以外の金属種の限界波長計測

応募者の開発する実験教材が、Cs に限らず他の様々な原子種を対象としても同様に仕事関数を測定できる汎用性を実験で明らかにする。一般にアルカリ金属の仕事関数は小さい値を示すことが知られているので、Cs 以外のアルカリ金属元素、あるいはその他の可視域に限界波長があると報告されている元素を対象に、それらの元素でできた陰極の中空陰極ランプに代えて、Cs のときと同じ原理・機器構成で仕事関数測定を試みる。また、光電効果信号の検出をフィルター回路で行うことも試し、学生の作業負担を減らすための検出系の簡略化も達成する。

(3) 教材の教育的効果の検証

大学生が履修する実際の実験授業の中で、本開発教材の教材としての有効性や教育的な効果を明らかにする。実験テキストを独自に作成し、学生に実験で使用してもらい、機器の使いやすさや安全性、機器の動作原理及び物理的内容の理解のし易さなどを中心にアンケート形式で調査を行う。そこで不備な点が見出された項目について、可能な限り改善する。

我々がオリジナルに提案した中空陰極ランプを利用した光電効果信号の検出方法により、これらの研究を通じて、以下のような特長を備える実験教材の完成が期待された。

- 市販の電源、抵抗、コンデンサからなる簡単な回路で光電効果信号を検出可能
- 遮光が不要でコンパクトな装置構成
- ランプの種類を変えて、様々な異なる元素で光電効果の実験が実施できる
- 多様な電気信号検出方法（ロックイン検出、フィルタ検出）を利用可能
- 開発教材を用いた物理量測定の高精度化
- 開発教材の汎用化
- 開発教材の教育的な有用性

仕事関数という物理量を通じて、光の粒子性や量子という概念に対して、テキストの記述を単に知識として受け入れるのではなく眼前の現象から原理（物理的・実験的）に即してその内容を考え理解する機会を学生に提供できるようになることを期待した。

3. 研究の方法

(1) Cs の仕事関数精密測定

我々の新しい仕事関数測定法が原理的に正しいかどうかを確かめるため、最も限界波長の値が長いセシウムで仕事関数測定実験を行った。その実験配置を図 1 に示す。HCL の電極間には定電圧電源で一定の電圧を印加した。高輝度白色 LED ライトからの出力光を光学バンドパスフィルタ (BPF、透過率の半値全幅 10 nm) に通して単色化し、それを HCL の Cs 陰極へ照射した。この照射光によって陰極 Cs で光電効果が生じれば光電子が発生するから、HCL 電極間のインピーダンスが変化する。これに伴う電圧変化を、フィルター回路とロックイン検出器を使って高感度に検出した。ロックイン検出のための照射光強度変調はチョッパーを用いて行い、その周波数は 400 Hz とした。これにより、室内の蛍光灯などが光電効果信号に及ぼす影響をカットすることができる。光学 BPF の種類（照射波長）を変えて、陰極 Cs に照射する光の波長（ λ ）を変えながら、ロックイン増幅器からの出力信号電圧を光電効果信号（ I ）としてモニターした。光電効果信号は、照射光のパワー及び波長の値を用いて最も短い照射光波長での信号電圧を基準に規格化した。限界波長付近で $I^{1/2}$ は $1/\lambda$ の一次関数となることが知られている。また、この傾きを ϕ 、切片を λ_0 とすると、限界波長の値は $|\lambda_0|$ で与えられる。実験結果を 1 次関数式でフィッティングし、その傾きと切片の値から Cs の仕事関数を求めた。

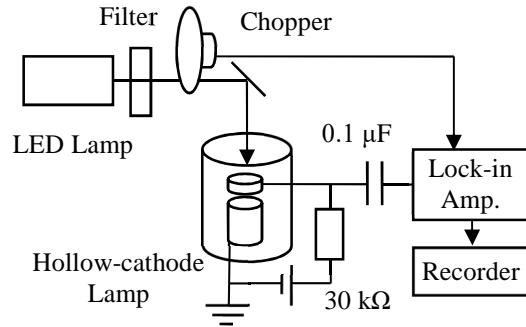


Fig. 1 Experimental setup

(2) K の仕事関数の測定

次に、我々の提案する新しい仕事関数測定法の汎用性を確かめるために、Cs とは異なる別の陰極元素の HCL に換えて Cs のときと同様の実験を行い、その陰極元素の仕事関数を再現性良く求められるかどうか確かめた。ここで選んだ陰極元素は K である。K は既に光電子放出法により仕事関数の測定結果があり、そこでは限界波長が 542 nm と報告されている。我々の測定方法でそもそも K の光電効果信号が検出できるか、測定から従来の報告例に近い限界波長が得られるか、を調べた。K の限界波長は可視波長域に存在すると予想できたので、実験も行いやすく、実験教材としての価値も高い。

実験配置は図 1 とほぼ同じであるが、K を陰極とする HCL を使用した点、光学 BPF の種類を K

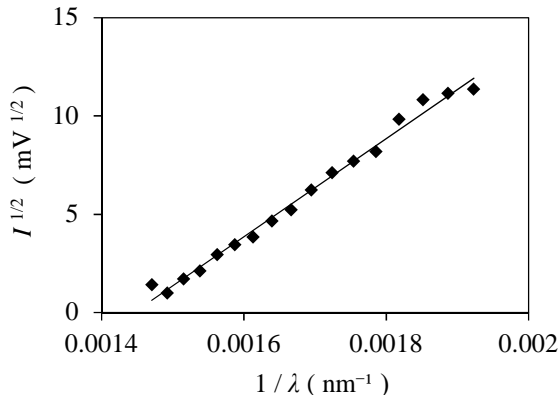


Fig. 2 Experimental result

Table 1 Limit wavelength of Cs

印加電圧 (V)	限界波長 (nm)
20	688 ± 12
100	688 ± 20
150	688 ± 18
200	694 ± 18
500	692 ± 19
600	689 ± 20

の限界波長の報告例を参考に選定した点などが異なる。実験手順、光電効果信号の検出原理、限界波長算出のためのデータ処理方法はCsの時と同じにした。

4. 研究成果

(1) Csの仕事関数精密測定

実験結果の一例を図2に示す。HCLの印加電圧は500Vで、横軸は波長()の逆数、縦軸は光電効果信号電圧(I)の平方根の値である。この実験結果をみると実験データはグラフ上で直線になっており、一次関数の関係を確認できた。さらにフィッティングにより傾きと切片を求め、Csの限界波長を求めたところ、 692 ± 19 nmという値が得られた。この値は既に報告されたCsの室温における仕事関数から換算して得られる限界波長(639 nm)よりも大きな値であった。

図2の結果が示すように、我々の新しい実験原理に基づき光電効果信号の検出には成功したといえたが、限界波長の値の差が何を理由として生じたかを調べるために、HCL電極間の印加電圧を変えて同様の実験を行った。電極間に印加する電圧によって、電極間に電場が生じ、それが電子に何らかの力を及ぼし、仕事関数を小さくする(光電子を出やすくする)効果が働いているのではと考えたからである。

そこで、印加電圧を20Vから600Vまで変化させて同様の実験を行い、得られた限界波長の値を比較した。その結果が表1である。この結果を見ると、印加電圧を変化させても限界波長は誤算の範囲で一致しており、影響を受けていないことが分かった。これらのことから、我々の測定で得られた限界波長と従来の測定例との差は陰極の中に生じた原因があり、具体的には陰極内に含まれているCs以外の元素の影響と考えられる。Csの融点は28°Cであり、CsだけではHCLの電極を維持できないため、いくつかの元素が混入され陰極を形成している。その混入元素の影響を受けて、仕事関数の値が変化すると明らかになった。

(2) Kの仕事関数の測定

Kの限界波長測定実験結果の一例を図3に示す。HCLの印加電圧は500V、横軸は波長()の逆数、縦軸は光電効果信号電圧(I)の平方根の値である。Kの場合も、照射光波長を短くしてゆく中で、530 nmあたりから光電効果信号を観測でき始め、それよりも短くするにつれて信号強度は増大した。図3のようなグラフで示した時、一次関数の関係にあることは明らかであり、フィッティングして限界波長の値を求めた。その結果、Kの限界波長は 587 ± 60 nmという値が得られた。従来の測定例の値(542 nm)とは誤差の範囲で一致していたが、最確値は大きかった。Csの時と同様に限界波長は長い値が得られたので、HCL陰極に含まれるK以外の元素の影響と推察されたが、念のためHCL電極間電圧を変化させて限界波長の値が変わるかも確かめた。その結果を表2にまとめた。印加電圧を200Vから600Vまで変化させても限界波長はほとんど変わらなかった。この結果はCsと同じである。誤差の範囲まで考慮すると、すべての印加電圧でKの限界波長が従来の報告例と一致することも確かめられた。我々の新しい仕事関数測定法が、特定の元素だけで偶然適応できたわけではなく、一般的に仕事関数測定法として有効であることを実験的に検証できた。

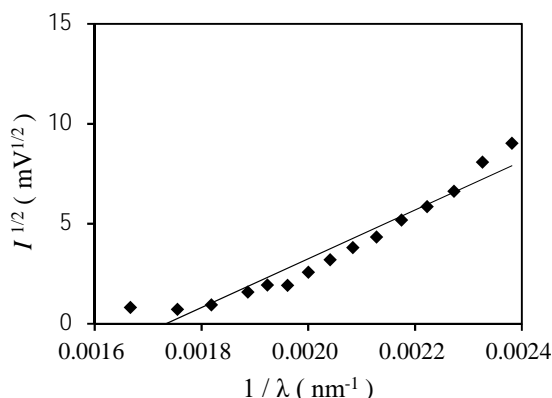


Fig. 3 Experimental result

Table 2 Limit wavelength of K

印加電圧 (V)	限界波長 (nm)
200	580 ± 66
300	589 ± 66
400	584 ± 71
500	587 ± 60
600	585 ± 57

(3) 成果のまとめ

我々が提案する新しい仕事関数測定法で、CsとKの仕事関数(限界波長)を求めることができた。実験室内で、比較的シンプルな実験配置で仕事関数を求めることができた。また、Kで得られた仕事関数の値は従来の別の研究手法で得られた値と誤差の範囲で一致した。我々の方法で得られた仕事関数の値は再現性もよかった。また、陰極に含まれる元素の影響で仕事関数の値が変化していることも明らかにできた。さらに、本手法の汎用性も高いと結論付けられた。これまでの研究成果は我々のオリジナルな成果であり、今までにない仕事関数測定法の原理的実証と物理実験教材への応用に向けた基礎データを得ることができた。

ここで開発した方法の物理実験教材への具体的な応用、特に教材化した機器の教育的効果の検証が完了せず残された課題となった。実際の教材化には、装置の構成やテキストの作成、使いやすさの検証や学生の理解の度合いの評価などを行う必要があり、今後の課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大向隆三、岩崎真衣、新井葵、近藤一史
2. 発表標題 ホロカソードランプ陰極カリウム原子の仕事関数測定
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大向隆三
2. 発表標題 レーザーの高精度制御と原子分光研究への応用
3. 学会等名 2018年度（第2回）広域科学教育学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大向隆三、武山尚豊、新井葵、近藤一史
2. 発表標題 中空陰極ランプ中カリウム原子の仕事関数測定
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----