

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 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：2013～2015

課題番号：25350235

研究課題名(和文) ホロカソードランプを用いた新しい仕事関数測定法の開発とその物理実験教材への応用

研究課題名(英文) Development of novel method for measuring the work function using the hollow-cathode lamp and its application for physics experiment

研究代表者

大向 隆三(OHMUKAI, Ryuzo)

埼玉大学・教育学部・准教授

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)：高校や大学で使用できる光電効果実験教材の開発のため、ホロカソードランプを光電管として利用する新しい方法を提案し、その実験に取り組んだ。我々の提案した方法に従い、光電効果信号の検出、光電効果の信号の物理的特性、セシウムを対象とした仕事関数測定の測定などを実現できた。我々の方法による測定ではセシウムの限界波長はおよそ690nmであったが、これはランプ陰極に含まれるPbなどの不純物により限界波長の値が従来の測定例よりも約40nmだけ大きくなると考えられる。ホロカソードランプを用いた金属の仕事関数測定としては本研究が初めての例であり、物理実験教材への応用を目指した基礎データを得ることができた。

研究成果の概要(英文)：We proposed a novel idea of detecting the photoelectric effect using a hollow-cathode lamp and demonstrated its experiment. Based on our idea, we could actually detect the photoelectric signal and its properties and determined the threshold wavelength of caesium atoms. As a result, the threshold wavelength from our experiments was approximately 690 nm which is 40 nm larger than that from the previous result. This is due to the impurities like Pb which is contained in the cathode of the lamp. Our research is the first demonstration of measuring the metallic threshold wavelength using a hollow-cathode lamp. This is the basic stage for the application of our experimental scheme for the physics teaching aid in high schools and universities.

研究分野：物理教育

キーワード：光電効果 仕事関数 ホロカソードランプ セシウム

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 世紀以降の量子物理の研究成果であり、実際のところあらゆる科学の分野の中でもミクロの世界を支配するこの量子物理は 1900 年以降の 100 年あまりの間にもっとも飛躍的な進歩を遂げた分野である。しかしながら、高校物理においてはこれらの内容について学ぶ時間は非常に短く、大学では理科系以外の学部の学生はほとんど学ぶ機会がない。将来科学を専門に学ぼうとする高校生や科学を教える立場に立とうとする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。そのため、当該分野において学生の興味をひき正しく内容を理解させることに効果的な実験教材を開発することは、極めて重要な意義を持つ。研究代表者はこれまでレーザー分光学の先端的研究に取り組んできたが、現在の勤務先(埼玉大学教育学部)へ赴任してから、文科系の大学生や高校理科教員を目指す学生の指導・教育にも取り組むなかで、大学でしっかり勉強してほしい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、教員側から言うところの効果的にその学習内容を演示し学生の興味をひくことができるような、学生の意見ではテキストの内容を納得して示してくれるような教材が不足していることを痛切に感じるに至った。例えば、高校の「物理」において「原子と原子核」という内容で量子論の入口を学ぶことになるが、教科書にはこの単元で学生が取り組むべき実験に関する記載が他の単元(いわゆる古典物理学の内容)に比べて圧倒的に少ない。さらに市販の実験教材カタログを見ても、一見してその動作原理を知るには困難なほど自動化・ブラックボックス化されているものが多く、中には実験者が容易に機器を操作できないよう意図的に使用の制限をしている教材もある。このような教材では、学生がテキストの記述を納得して理解できるかどうか不安であると言わざるを得ないし、講義で教員が実験をデモンストレーションしても学生の学習意欲を喚起するには不十分だと思われる。

量子物理を学び始める段階では、光の粒子性が重要な内容となる。エネルギーを持つ粒子となる「量子」の考えに、学生が初めて触れる機会となるからである。それゆえ、光の粒子性を見出す契機となった光電効果について、その現象を理解して関心を持たせるのに有用な実験教材の開発が強く望まれる。現在市販されている光電効果実験教材では、実験機器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、光電効果に特徴的な物理量として挙げられる仕事関数の測定は、上記の教材では行うこ

とができず、現在のところ光電子分光や熱電子放出などの高度な実験手法を通して行われるのが一般的であり、これらは設備の高価さ・複雑さや機器の操作の困難さなどの点から高校や大学で活用する教育機器として適切であるとは言い難いという背景があった。

2. 研究の目的

そこで本研究では量子物理の入口となる光電効果の現象を取り上げ、高校や大学で利用できる実験教材の開発を行う。光量子仮説の考えを実験を通じて理解することで、学生がスムーズに古典物理学と現代物理学の考え方の違いを理解できるようにすることを狙う。光電効果の現象の中でも特に仕事関数にスポットを当て、金属の仕事関数を測定できる実験教材として完成させることを目指す。

従来の仕事関数を求めるために使われてきた光電子分光や熱電子放出のような技術とは異なる、実験教材への応用に向けた新しい仕事関数測定法を開発を行う。具体的には、光源(ハロゲンランプ等)、光電管(ホロカソードランプ)、簡単な電子回路と光学機器(光学フィルター、レンズ、ミラー等)からなる装置で仕事関数を測定できる実験技術である。実験者自身が単色光を発生させ、それを光電面に照射する光学配置を組み、観測されるデータと物理現象の対応をつけながら物理的内容を理解できる教材の開発を目指す。また、我々の開発した方法と他の方法による仕事関数測定結果を比較して、実験条件が仕事関数の値に与える影響などの物理学的知見を得るための研究も行う。

このような新しい技術を光電効果の実験教材へ活用し、

- ・装置を一見してその動作原理が理解できる
- ・テキスト等に記載された物理的内容を正しく実験結果で示すことができる
- ・特殊な設備(暗室、真空、大容量電源)を必要とせずに一般的な教室や実験室で動作可能
- ・学生数名が一度で実験できるコンパクトさの 4 点を全て満たすことができる実験教材の実現を目指した。

本研究の特長は、光電効果をおこす光電管の代わりに「ホロカソードランプ」と呼ばれる放電管を用いる点にある。このランプは陰極が中空円筒の形をしており、本来は原子吸光分析の用途に用いられる。そのため、従来はこれを光電管として使用する光電効果の研究や実験教材はなかった。ホロカソードランプを用いれば、放電プラズマのインピーダンス変化から光電子数を換算して求めることができるので、

- ・市販の定電圧電源と抵抗、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(電気的な回路で必要な信号だけ得る)

・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などの技術的メリットが期待される。

これにより、光電子分光や熱電子放出といった従来の測定法よりもはるかに簡便な新しい仕事関数測定法を実現させる。家庭用のコンセントだけで電源を供給し、機器全体をテーブルトップ・サイズで構成する。

さらに、この技術を実験教材化することにより、従来にはなかった光電効果に関するユニークな教材を完成させる。すなわち、学生が教室の蛍光灯の下でも自分で装置を操作しながら光電管に光をあてて光電効果の信号を検出でき、入射光の波長を変えながら仕事関数の値を定量的に知ることができる、という教材である。本研究課題で開発された教材を用いて学生が学習することにより、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ことが期待される。

3. 研究の方法

初年度は Cs のホロカソードランプを光電管として用いた時に得られる光電効果信号の基礎特性を計測した。光源からの光をチョッパーに通してランプの陰極へ照射した。ランプには一定の電圧を印加しておき、チョッパーによる光強度変調と同期して光電効果が起きると光電子が陽極へ流れて放電管のインピーダンスが変化する。この変化を、電圧値としてコンデンサ経由でモニターへ出力し、その値を読み取った。このときの実験配置を図1に示す。

まずハロゲンランプ（白色光）を光源として、入射光強度に対する光電効果信号の変化を測定した。次に、ハロゲンランプからの白色光を半値全幅 100 nm 程度の 3 種類のバンドパスフィルター（中心波長 450 nm、520 nm、600 nm）に通して波長分布を制限した光をランプに照射して、入射光の波長域の違いによる光電効果信号強度の変化を測定した。測定では 3 つの波長域で入射光子数が同じになるよう光強度を ND フィルターで調整しておいた。最後に、光源をヘリウムネオンレーザーに替え、ホロカソードランプへレーザー光を照射して光電効果信号を測定した。ヘリウムネオンレーザーの発振波長は 632.8 nm であり、現在判明している Cs の限界波長(640 nm)に近くて短い。この実験データから、ホロカソードランプで Cs の仕事関数を測定する際に最低限必要な入射光強度を明らかにした。上述の通り仕事関数の測定にはロックイン増幅器を用いたが、実験教材の中にそれを用いることは操作の煩雑さや原理の難しさなどから適切ではない。そこでこの部分をアクティブ・フィルタと増幅回路を合わせた電気

回路に置き換えることを試みた。この置き換えにより、実験で取り組む学生が光電効果信号の検出原理を明確に理解できるようになると考えられる。個々の回路の動作性能をチ

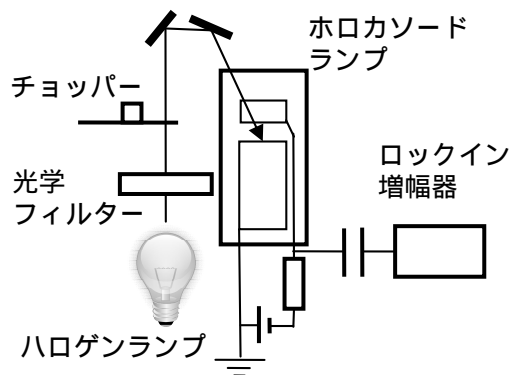


図1 実験配置

ェックし、光電効果信号検出回路に組み込んで Cs の仕事関数測定を行うための基礎データとした。

H26 年度には、初年度の基礎データに基づき Cs の仕事関数を測定した。ハロゲンランプからの白色光を狭帯域バンドパス・フィルタ（透過率の半値全幅が 10 nm）で単色化し、それをホロカソードランプに照射した。入射光波長を変えながら光電効果信号強度の変化を検出し、ある波長を境界に光電効果信号がステップ的に発生（消滅）するかどうかを調べ、Cs のおよその限界波長を得た。ここで得られた結果を文献（H. B. Michaelson, J. Appl. Phys. 48 (1977) 4729-4733）の値と比較した。

H27 年度では、放電の影響で仕事関数が増える可能性があるため、ホロカソードランプの印加電圧を変えながら上記と同様の実験を行い、印加電圧と仕事関数の関係を明らかにした。また、限界波長付近で金属表面における光電子放出の量子効率を考慮して仕事関数を決定することも試みた。また、上記で開発した仕事関数測定法を研究代表者の所属する大学での実験授業で活用する準備を行った。

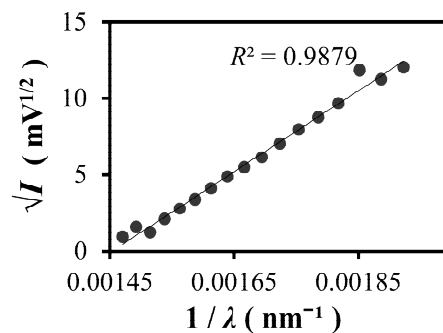
すべての研究期間を通じて、実験室で数名の学生が共同して実験作業をできるようにコンパクトにおさまるように工夫して配置をし、持ち運び可能な小型光学定盤上に設置した。学生が見た目に操作しやすいように使用する機器を配置し、ケーブルの取り回しによる不測の事故や感電事故などが発生しないよう十分な安全性を確保した教材に仕上げよう努めた。

4. 研究成果

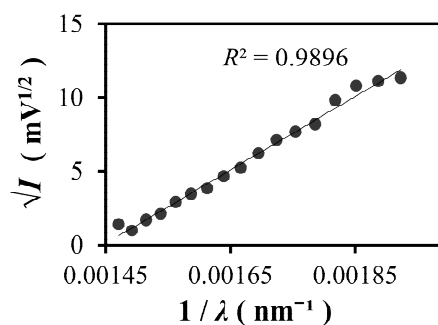
H25年度はホロカソードランプを用いた光電効果信号の検出限界を明らかにした。ヘリウムネオンレーザー光の照射により、光電効果信号強度を測定した。その結果、入射光強度に対して信号強度は比例して変化し、最小で 2.26 mW/cm^2 まで信号を検出できた。ロックイン増幅器を用いてさらに検出感度を高めた結果、 0.2 mW/cm^2 まで信号を検出することが可能となった。この結果から、狭帯域バンドパスフィルターの透過光を用いた光電効果信号検出にむけた目処が得られた。また、光電効果信号の高感度検出のための二段増幅型バンドパスフィルターの設計、製作、特性評価を行った。汎用オペアンプを用いて回路を組み立て、中心周波数 400 Hz 、 Q 値 50 のバンドパスフィルターを完成させた。増幅回路も組み合わせ、このフィルターを用いて光電効果信号の検出を実際に行った結果、入射光強度 1.5 mW/cm^2 まで検出できた。

H26年度はハロゲンランプを光源としてセシウムの仕事関数を求めた。光学系を配置しなおし、効率的にハロゲンランプ光がランプ陰極に照射されるよう改善した。入射光は狭帯域バンドパスフィルターで単色化した。入射光波長を 590 nm から 700 nm まで 10 nm ごとに変化させながら照射し、光電効果信号を測定した。その結果、波長 590 nm から 600 nm までは信号が急激に増大し、 610 nm では完全に消失した。 620 nm では再び信号を検出でき、 630 nm で信号は最大になったあと、 640 nm よりも長い波長域で信号は単調減少することがわかった。このような複雑な変化の仕方は当初予想しておらず、我々はその原因をホロカソードランプ内に封入されたバッファガス (Ne) による入射光吸収であると考へた。そこで我々はバッファガスが封入されていないホロカソードランプを用意し、同様の実験を実施した。それで得られた実験結果は波長 590 nm から 660 nm まで光電効果信号が単調減少するというデータであった。このデータは量子効率を勘案すると定性的には当初の予想通りの結果が得られたので、ここのデータを理論式 (量子効率を加味した光電効果信号の波長依存性) とフィッティングさせて陰極セシウムの限界波長の値を決定した。求められた値は 674 nm であった。この値は従来の報告例 (640 nm) と比べて 34 nm だけ大きな値であった。この差を生じさせた原因としてランプ電極への印加電圧 (200 V) が挙げられた。

H27年度は印加電圧が陰極セシウムの限界波長に及ぼす影響を調べた。H26年度に実施した実験と同じ方法で、ランプへの印加電圧を 20 V 、 100 V 、 150 V 、 200 V 、 500 V 、 600 V にして限界波長を求めた。その結果得られた限界波長の値は、 $688 \pm 12 \text{ nm}$ (20 V)、 $688 \pm 20 \text{ nm}$ (100 V)、 $688 \pm 18 \text{ nm}$ (150 V)、 $694 \pm 18 \text{ nm}$ (200 V)、 $692 \pm 19 \text{ nm}$ (500 V)、 $689 \pm 20 \text{ nm}$ (600 V) となった。すべての実験結果で理論式とのフィッティングの相



(a)



(b)

図2 実験結果

(a) 放電電圧 100 V (b) 放電電圧 500 V

関係数は 0.98 以上となり、理論式と実験データでよい一致が見られた。放電電圧が 100 V と 500 V のときの実験結果、及び理論式とのフィッティング結果を図2に示す。上記の結果から、印加電圧を変えても限界波長の最確値は従来の報告例の値 (640 nm) と比べてやはり約 40 nm 大きくなった。また、誤差の範囲を考慮しても、実験から得た限界波長は従来の報告例の値とは一致しなかった。

以上の実験結果を総合的に考察すると、ホロカソードランプ中の陰極セシウムの限界波長は、従来報告されているセシウムの限界波長の値よりも実際に約 40 nm 大きくなっていると考えるべきとの結論を得た。この差を生じさせている原因をまだ特定できていないが、少なくともH26年度の考察結果のようなランプ電極への印加電圧ではない。ひとつの可能性として、陰極を固めるためにセシウムと混ぜて使用した不純物の影響が考えられる。セシウムの融点は 28°C と他の金属に比べて比較的低い。これを放電ランプの電極として使用するためには、相応の温度でも溶けないよう合金状態にして使用が必要がある。実際、市販のホロカソードランプでは鉛を混ぜて陰極が製作されている。金属の仕事関数 (限界波長) は一般的に表面の状態や周囲の温度、不純物の影響を敏感に受けることが知られている。今回の実験でも、不純物の Pb の影響が考えられる。

現時点で、ホロカソードランプで光電効果

信号を検出できること、その信号特性、光電効果信号から限界波長を求める原理について実験的検証を完了できた。残る研究課題として、セシウム以外の元素への応用、当該実験機器を用いる教育的効果の検証などがある。今後はそれらへの展開を見据え、継続して研究に取り組んで行く予定である。

なし

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 4件)

大向隆三、布施陽子、松本龍馬、近藤一史
「ホロカソードランプを用いた光電効果実験()」第63回応用物理学会春季学術講演会(東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区))、21a-P2-6、2016年3月21日

大向隆三、小林憲治、國料樹「フィルター回路を用いた光電効果信号の高感度検出()」第62回応用物理学会春季学術講演会(東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市))、13p-P1-2、2015年3月13日

松本龍馬、小林憲治、國料樹、大向隆三「ホロカソードランプを用いた光電効果実験()」第62回応用物理学会春季学術講演会(東海大学湘南キャンパス(神奈川県平塚市))、13p-P1-3、2015年3月13日

大向隆三、小林憲治、松本龍馬、近藤一史
「フィルター回路を用いた光電効果信号の高感度検出」第61回応用物理学会春季学術講演会(青山学院大学相模原キャンパス(神奈川県相模原市))、18a-PA1-12、2014年3月18日

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等 特になし

6. 研究組織

(1)研究代表者

大向 隆三(OHMUKAI, Ryuzo)
埼玉大学・教育学部・准教授
研究者番号：40359089

(2)研究分担者

近藤 一史(KONDO, Hitoshi)
埼玉大学・教育学部・教授
研究者番号：40178421

(3)連携研究者