

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21882

研究課題名（和文）負性電子親和力を利用した高密度ポジトロニウム生成のためのダイヤモンド表面制御

研究課題名（英文）Research of surface termination mechanism for high density positronium production based on negative electron affinity

研究代表者

田中 真伸（Tanaka, Manobu）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：00222117

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究を通してアエロゲルと同程度の生成量を持つターゲットとして、表面装飾を行なったダイヤモンドの可能性を提案できた。また入射陽電子のエネルギーが低い位置に生成ピークを持つことは利点である。基板の組成と生成量の相関も明らかになってきており、現在第一計算原理等の手法を使用しモデルの検討を始めた。  
今後試料の数を増やし低エネルギーポジトロニウム生成に最適なダイヤモンドターゲットの研究をさらに進める。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低温かつエネルギーのそろったポジトロニウム(Ps)の生成手法を研究開発し、Psのボーズアインシュタイン凝縮(BEC)が実現すれば、BECの研究だけでなく、素粒子原子核分野における反物質を含む系の物理法則の研究や物性物理研究のプローブとして役立つ他、複数の工学応用が考えられる。

研究成果の概要（英文）：Surface-terminated diamonds has capability of high-density positronium-production target-material as same as aerogels. The production peak at low positron incident energy has benefit from the view point of positron cooling. A model construction is in progress using experimental data and first-principles calculation. We will develop new target which produces dense and low energy positronium for quantum beam science.

研究分野：高エネルギー加速器素粒子原子核実験 測定器開発

キーワード：ダイヤモンド

1. 研究開始当初の背景

ポジトロニウムは電子とその反物質である陽電子からなる2体束縛系ボーズ粒子であり、ボーズアインシュタイン凝縮への遷移温度はボーズ粒子の質量に反比例するため、PsはBECが実現されている他の原子と比較し臨界温度を高くできる利点をもつ。具体的にはドブロイ波長と密度の関係、及びドブロイ波とボーズ粒子の質量と温度の関係は次の2式で

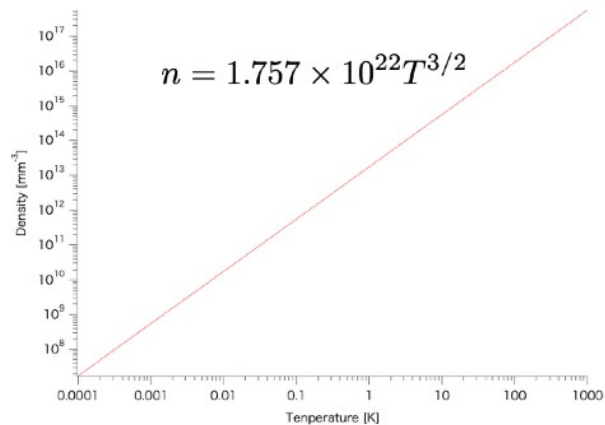
$$n\lambda_D^3 \geq 2.612 \quad \lambda_D = h/\sqrt{2\pi m k_b T}$$

与えられるため、

これらから以下の式が導出でき右図

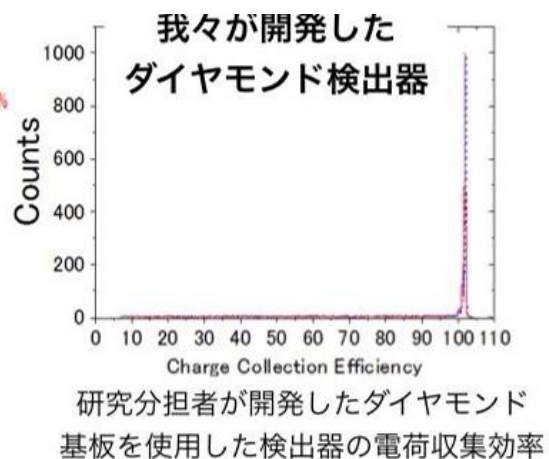
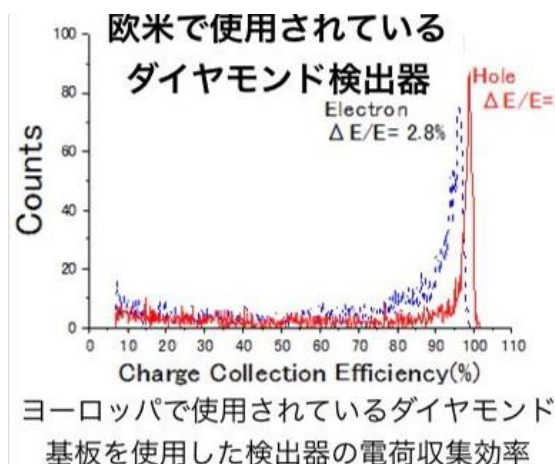
$$n \geq 2.621 \left[ \frac{\sqrt{2\pi m k_b}}{h} \right]^3 T^{3/2}$$

が求められ、他の重い粒子より低い密度で臨界に達することがわかる。



一方ポジトロニウムは寿命を持つため、ポジトロニウムの冷却方法に関しては、加速器を用いて寿命を長くし臨界密度へ到達する手法や、ポーラスシリカ等を用いてポジトロニウム生成断面積を上げることで、ポジトロニウム密度を上昇させ短い時間で冷却する方法などが古くから提案され研究されていた。さらにJ.Phys.B49(2016)104001において、熱冷却のみでは寿命の時間内に臨界温度を超えることは困難であると指摘されレーザー冷却も提案されている。

現在まで日本におけるダイヤモンド研究者のネットワーク(物質・材料研究機構、産業技術総合研究所、筑波大学、東京大学、北海道大学、高エネルギー加速器研究機構)は互いに連携し、ダイヤモンド電子デバイス研究行いつつ(例として下図にダイヤモンドを用いた放射線検出器の例を示す。これは現在福島廃炉プロジェクトへ応用を展開している。)、分野横断研究の基盤を形成してきた。その中で後述するダイヤモンドが併せ持ついくつかの特性(負性電子親和力、原子分子による表面制御、ダイヤモンドプロセスによる微細加工等)は、半導体物性や表面科学の点からも興味深く研究対象になるだけでなくポジトロニウム生成標的として新しい候補となる可能性もあり協力体制が構築された。



## 2. 研究の目的

本研究はダイヤモンドが持つ負性電子親和力 (Negative Electron Affinity)、高熱伝導率、高耐放射線性能およびダイヤモンドの表面ターミネーション制御と3次元加工技術を使い、ポジトロニウムの生成量の増加及び生成時の温度を研究することを目的とする。これにより、先行実験で困難であったPsの熱冷却の実現可能性を探る。負性電子親和力を持つダイヤモンドを低温冷却することで電子のエネルギー分散を低く抑え、協力会社によって開発されたダイヤモンドのマイクロストラクチャ構造を使用することで、形状を制御し表面積を大きくしポジトロニウムの生成量を上げることを念頭に置き予備実験を進める。また表面ターミネーション原子分子と印可電場によって表面近傍のポテンシャルを制御し、トラップされた電子と入射陽電子からPsを生成し陽電子ビームのエネルギー分散程度にエネルギーの揃った低温ポジトロニウム生成を狙う。将来的にはダイヤモンドの優れた熱伝導率および耐放射線性能を用いて高強度陽電子ビーム下でのポジトロニウムの生成実験を推進する。

このためにこの研究では次に述べるテーマを遂行する。

(a)ダイヤモンド表面ターミネーション操作と陽電子ビームを利用したポジトロニウム生成実験及び表面評価データの取得。

協力機関の研究者と連携し表面ターミネーション、結晶方位の違いによるポジトロニウム生成量の変化を測定する。また結晶欠陥が生成に及ぼす影響及び結晶基板の組成の違いも評価する。

(b)ダイヤモンド加工プロセスの開発。

協力機関等の研究者と連携し、できるだけ欠陥導入を減らした表面加工プロセスを開発する。(理論上は欠陥が少ない方が生成量は増加するため、また表面ターミネーションを行う場合も欠陥が少ない方が安定した状態を維持できる。)

## 3. 研究の方法

前節で述べた以下の二つに関して手法を記述する。ただし一部プロセス等に関しては特許未取得情報も含むため詳細な情報は開示できない。

(a)ダイヤモンド表面ターミネーション操作と陽電子ビームを利用したポジトロニウム生成実験及び表面評価データの取得。

ダイヤモンドターミネーションに使用する原子分子は多く提案されているため、全てを網羅することはできない。本研究では負性電子親和力を持たせるために表面ポテンシャルを変化させる2種類の原子を用いて負性電子親和力の効果を確認する。ダイヤモンド基板の種類に関しては、高温高圧合成基板、化学気相成膜法を使用し結晶を成長させた基板、不純物の多さによる違い (IIa及びIb) に関して複数の基板を使用し調査を行う。

欠陥の及ぼす影響に関しては、複数の化学気相成膜法を使用し結晶を成長させた基板及び中性子照射基板に対して調査を行い比較をする。

また欠陥に関しては短波長レーザーを用いてデータを取得し詳細を評価する方法も検討する。

(b)ダイヤモンド加工プロセスの開発。

ダイヤモンド加工プロセスは、いくつか提案されており協力機関の装置を使用させていただきながらマスク作成、エッチング等の作業を進めることとする。どの程度までの構造が作成可能かを明らかにするためにプロセスパラメータも含め調整を行う。また欠陥導入がどの程度になったかについては陽電子ビームを使用した欠陥評価などで調査を行う。

## 4. 研究成果

ダイヤモンドに対する表面装飾原子は多く提案されているが、本実験では限られたリソースを使用し効率よく実験を行うために、装飾の種類を絞りの2種類を評価した。真空に対してコンダクションバンドのエネルギーレベルが正になるものと負になるものの2種である。ダイヤモンド基板の種類に関しては窒素のコンタミが多いもの(Ib)とコンタミが少ないもの(IIa)の2種類を購入して調査した。また基板の製作条件として化学気相成膜法と高温高压合成の基板を使用した。

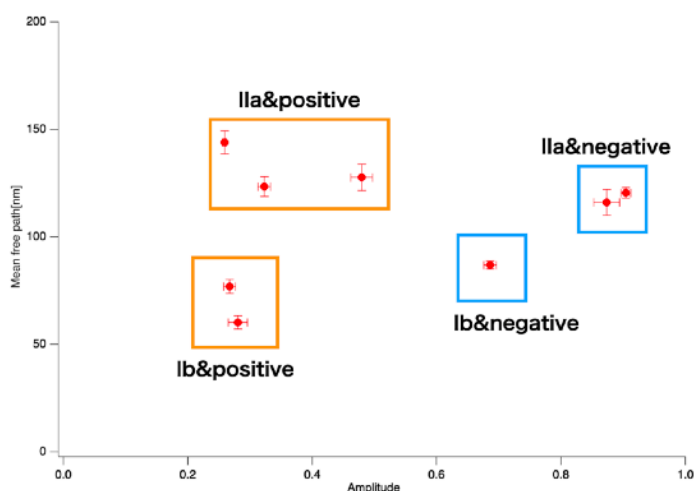
ポジトロニウム生成に関する評価は以下の式を使用した。すでに文献1で提案されている式が存在しており当初評価関数として使用していたが、得られた $\gamma$ 線エネルギースペクトルの積分範囲に対して敏感であり、ポジトロニウム生成率を過大評価する傾向にあったため、新しい計算式を使用した。入射陽電子に対する生成率の振る舞いはどちらの式も同じ傾向を示すことは確認している。ここで $P$ は $2\gamma$ 線崩壊によるピーク値近傍の事象積分、 $V$ は $2\gamma$ 線崩壊によるピーク値から離れた部分でかつコンプトン事象を含まない $\gamma$ 線イベントの事象積分を意味する。また添字がついていないものは測定対象試料、 $a$ はアエロゲル、 $0$ は $oPs$ 生成がゼロである陽電子の入射エネルギーが $28keV$ のダイヤモンドのデータをそれぞれ意味する。

$$f_{33a} = \frac{R - R_0}{R_a - R_0} \quad R = \frac{V}{P}, R_0 = \frac{V_0}{P_0}, R_a = \frac{V_a}{P_a}$$

ここで注意しておいて欲しいのは、文献1では高温ゲルマニウムをターゲットとして使用しているが、本実験では高温ゲルマニウムでの実験ができなかったため、入射エネルギーが高い陽電子アエロゲルを100%として使用していることである。よってここで示すポジトロニウムの生成比はアエロゲルとの生成量比と思ってもらっても差し支えない。

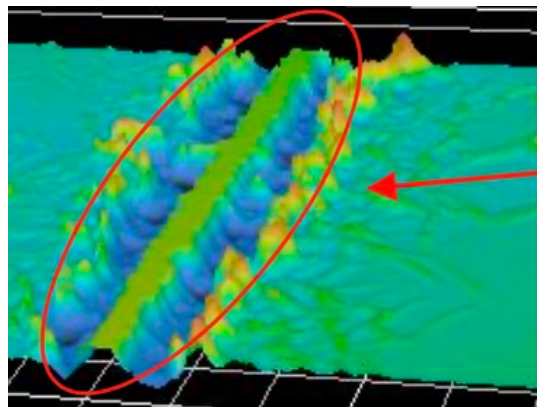
詳細は省くが、簡単なモデルを作り生成率と侵入長の関数でこれらのデータをまとめると次に述べる傾向があることがわかった。内部の結晶欠陥及び不純物に関しては少ない方が生成率は高い。コンダクションバンドのエネルギーレベルが真空のエネルギーレベルに比べ負になるものの方が生成率は高い。基板の製作方法の違いに関しては、気相成長させたダイヤモンド基板の購入が容易ではなかったためサンプル数が少なく優位な結果を見出せなかった。これ以外に結晶成長面に関する差も今後サンプル数を増加させて評価していく予定である。

今回コロナ等で海外渡航が禁止され、予定していた生成されたポジトロニウムのエネルギー測定ができなかったため、今後はTOF実験を行うことで生成されたポジトロニウムのエネルギーとその分散を測定し、表面装飾に対する依存性を見ることで、表面ポテンシャルの形状を変えた時のポジトロニウム生成のダイナミクスを明らかにする。これに結果と第一原理計算を比較することでどの程度エネルギーが揃ったポジトロニウムを生成可能かが定量的に予想できるようになるはずである。



表面処理を行った複数のダイヤモンド基板に筑波大学の陽電子線を照射しポジトロニウムの生成量をアエロゲルと比較した。基板は複数の会社から購入した。真空のエネルギーレベルに対して負になるものの方が生成量は大きくなっている。

ダイヤモンド表面に対する加工プロセスに関しては、フォトリソでマスクを製作後に協力会社で加工を行ってもらった。その結果を右の図に示す。この実験から、規則的なパターンを作り、プロセス条件を絞り込むことで高さ数十 $\mu\text{m}$ 、幅数 $\mu\text{m}$ の加工が可能になる。現在この加工によって結晶欠陥が導入されていないことを確認するための実験を遂行中である。



レーザー顕微鏡でプロセス後のダイヤモンド基板表面を観察した図。壁の高さは一番深いところは40 $\mu\text{m}$ 、平坦部分では10 $\mu\text{m}$ である。壁の幅は8 $\mu\text{m}$ である。

まとめとしては、アエロゲルと同程度の生成量を持つターゲットとして、表面装飾を行なったダイヤモンドを提案することができた。入射陽電子のエネルギーが低いところにピークを持つため、生成されたポジトロニウムのエネルギーは低いことが予想される。また基板の組成と生成量の相関も明らかになってきており、現在第一計算原理等の手法を使用しモデルの検討を行っている。基板の製作手法とポジトロニウム生成に関しては、今回は試料の数が少なく明確な相関を見つけることができなかった。今後試料の数を増やしつつ、試料内でのポジトロニウム生成過程についてのモデルを構築しながら、ポジトロニウム生成に最適なダイヤモンドターゲットの製作手法を開拓していく。

文献 1 : Marder S et al. 1956 Phys. Rev. 103 1258

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
研究分担者	上殿 明良  (Uedono Akira)  (20213374)	筑波大学・数理物質系・教授    (12102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関