

半導体核スピンデザイン技術の研究開発 (0213009)

Fundamental research development of design technology of semiconductor nuclear spin

研究代表者

熊谷 寛 (大阪市立大学大学院工学研究科)

Hiroshi Kumagai (Graduate School of Engineering, Osaka City University)

研究分担者

小林 中 (大阪市立大学大学院工学研究科)

Ataru Kobayashi (Graduate School of Engineering, Osaka City University)

研究期間 平成 14 年度～平成 18 年度

本研究開発の概要

核スピン0の質量数28シリコン基板に、核スピン1/2を持つ質量数29のシリコン原子を制御・配列させる技術は、不純物を添加しなくても核スピンをキュービットに利用できる新たな固体量子位相ゲートの開発の強力な推進力になりうる。本課題では、深紫外コヒーレント光技術を開発・駆使して、レーザー冷却により単一核スピン・シリコン原子ビームを発生させ、開発する反射型原子ホログラムで、単一核スピンのシリコン原子を基板上に制御・配列させるための基盤技術を開発する。

Abstract

The advantages of an all-silicon implementation are: 1) the crystal growth and processing technology for silicon are highly matured; 2) the most sensitive structures for force detection have been made from pure silicon; and 3) the family of stable nuclear isotopes of silicon is quite simple in composition: 95.33% of natural silicon is ^{28}Si or ^{30}Si , which are both spin 0, and 4.67% is ^{29}Si , which is spin 1/2, perfect for the qubit. In this project, a new technique of manipulating the family of stable isotopes of silicon with laser cooling has been proposed. The laser cooling technique allows us to slow down neutral atoms to roughly the speed of a mosquito and then to control their motion with unprecedented precision. We aimed to develop the fundamental technologies regarding the spatial design of nuclear spins of the family of stable isotopes of silicon through the advanced technology of atom holography with laser cooling.

1. まえがき

核スピンを持たない質量数28のシリコンウエハの上に、核スピン1/2を持つ質量数29のシリコン原子を制御・配列させる技術は、不純物をまったく添加しなくても核スピンをキュービットとして利用できる固体量子位相ゲートの実現への展開性がある。本課題では、この半導体核スピンデザイン技術を開発し、横方向をレーザー冷却し分離した単一核スピン・シリコン原子ビームを生成し、反射型原子ホログラムで反射させ、核スピンを持たない質量数28のシリコンウエハの上に、単一核スピンのシリコン原子をデザインするための基盤技術を開発する。具体的には以下の核スピンデザインのための要素技術を開発した。

- 1) 同位体シリコン原子の分離技術の開発
 - ・連続波、単一周波数、深紫外コヒーレント光源の開発
 - ・深紫外コヒーレント光源の精密同調技術の開発
 - ・シリコン原子の精密原子分光
- 2) 高指向性シリコン原子ビーム源の開発
- 3) 核スピンデザインのための原子ミラーの設計
- 4) 核スピンデザイン用原子ミラーの作製技術の開発
- 5) 核スピンデザイン用原子ミラーの励起光源技術の開発

2. 研究内容及び成果

- 1) 同位体シリコン原子の分離技術の開発
シリコン原子のレーザー冷却波長は深紫外域の252.4nmであり、単一周波数、高光出力を必要とするため、開発の困難さから実用的な光源は全く開発されて来な

かった。研究代表者は世界に先駆けて実用的なシリコン原子のレーザー冷却光源の開発に成功した。単一モードチタンサファイヤレーザー光の746nmの第2高調波と半導体レーザー光の780nmの和周波発生により、波長252.4nm(波長可変)、線幅高々12MHz、出力50mWを実現した。しかし半導体核スピンデザイン技術の開発のためには、開発目標の連続光で100mW程度の光出力が必要であるとともに、更なる高出力化を実現する出力スケールアップを見いだす必要があると考えた。シリコン原子の冷却波長252.4nmに同調可能であり、コヒーレント光源の線幅をシリコン原子のレーザー冷却遷移の自然幅29MHz程度以下、さらに連続波で100mWレベルの出力レベルを開発目標に、新たに、2台のリング型単一モードチタンサファイヤレーザーを駆使した、高出力、単一周波数、波長可変、深紫外コヒーレント光源を開発した(図1)。

さらにシリコン原子の同位体を制御するために、個別の同位体に共鳴できる、具体的には、シリコン原子の同位体間隔程度(400MHz)に渡って、3MHz(自然幅の1/10)程度の精度の周波数精密同調技術を開発する必要がある。そこで研究代表者が開発したCW単一周波数深紫外コヒーレント光源において、その周波数制御を簡便にできる手法を提案した。結果的に和周波である252nm光の周波数の微調が実現できた。

次に、開発したCW単一周波数深紫外コヒーレント光源を用いて、同位体シリコン原子(単一核スピン)の分離技術に必要な、シリコン原子の精密光ガルバノ分光技術の開発を行った(図2)。

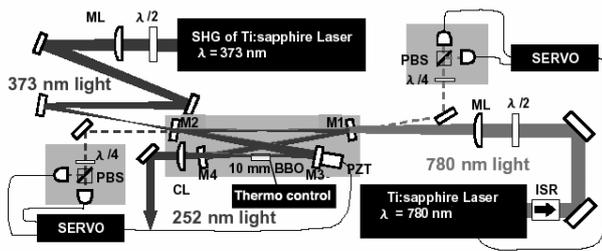


図1 連続波、単一周波数、深紫外コヒーレント光源の概略図

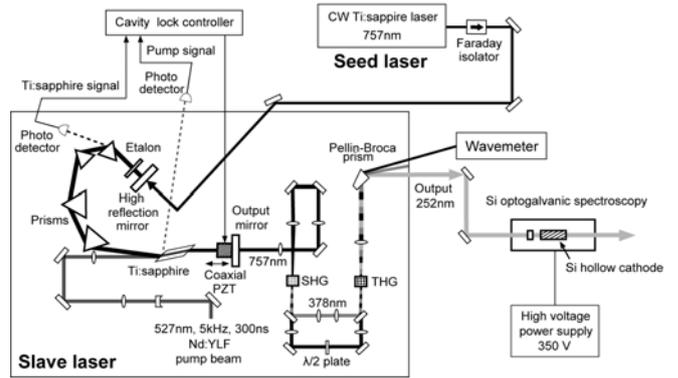


図3 核スピンドesign用原子ミラーの励起光源の概略図

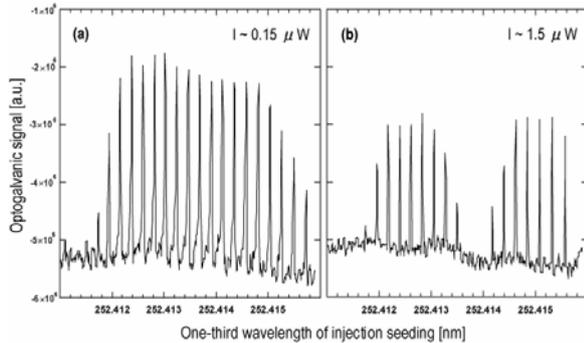


図2 シリコン原子の精密原子分光

2) 高指向性シリコン原子ビーム源の開発

高指向性シリコン原子ビーム源の開発に向けて、複数の空間的アパチャーでシリコン原子ビームをコリメーションしたシリコン原子ビーム源を開発した。シリコンの原子ビームは、シリコンの単結晶ロッドを陽極に、リング状のフィラメントを陰極にした電子ビーム蒸発源を用い、電極間に1.5kVを印加して、発生させた。

3) 核スピンドesignのための原子ミラーの設計

設計にあたっては、モンテカルロ法を用いて、より現実的な配置での原子ミラーによる同位体シリコン原子の反射をシミュレーションした。シミュレーション計算には、導波路層に深紫外光を閉じ込めてエバネッセント場を増強でき、原子層堆積法で作製可能な誘電体2層膜構造の原子ミラー構造を採用した。

4) 核スピンドesign用原子ミラーの作製技術の開発

繰り返し最表面の化学反応を起こさせることで、0.1nm精度でデジタル的に酸化物を原子層堆積させることができた。サファイヤプリズムを用い、ギャップ層に酸化シリコン層を用いると、この酸化アルミニウム薄膜を導波路層として用いることができる。本研究では初めて、シリコン原子用原子ミラー作製のための作製技術を開発した。

5) 核スピンドesign用原子ミラーの励起光源技術の開発

シリコン原子のレーザー冷却のためには、 $3^3P_1 - 4^3P^0$ の冷却遷移に共鳴する252.41 nm深紫外領域の光が必要となるが、誘電体界面に発生するエバネッセント場を利用して原子を反射する原子ミラーを用いて同位体シリコン原子を制御するには、同様の252.4nmの光源の線幅だけでなく光強度も重要な要素で、100W程度の尖頭出力が必要である。それゆえ、本課題において、尖頭光出力の高いパルス光源を注入同期することによって単一周波数化を実施した。注入同期において、シード光の周波数とスレーブレーザー共振周波数を動的に一致させる高度周波数制御技術も開発した(図3)。

3. むすび

以上総じて、開発目標を100%達成し、世界に誇れる、独創的かつ革新的な成果が得られた。研究代表者らが積み重ねてきた独創的な技術開発(種々の制御装置を含む)の上に本課題を展開することで、核スピンドesign技術の開発に必要な極限性能を有する2台の、連続波、単一周波数、波長可変、深紫外コヒーレント光源装置、単一周波数ナノ秒パルス深紫外コヒーレント光源装置を開発したばかりでなく、原子ミラー作製の、原子層堆積装置も開発することができ、投入された費用以上の効果、成果をあげることができた。

【誌上発表リスト】

- [1] H. Kumagai, Y. Asakawa, K. Midorikawa, and M. Obara, "All-solid-state deep-UV coherent light source for laser cooling of silicon atoms", in Frequency Standards and Metrology, edited by P. Gill (World Scientific, New Jersey), pp.552-554 (2002).
- [2] H. Kumagai, "Development of a Continuous-Wave, Deep-Ultraviolet, and Single-Frequency Coherent Light Source- Challenges toward laser cooling of silicon", IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron. **10**, pp.1252-1258 (2004).
- [3] Y. Shiomi, K. Kyutoku, H. Kumagai, and A. Kobayashi, "Characterization of frequency-tripled nanosecond pulsed Ti:sapphire laser injection-seeded by frequency-scanning cw Ti:sapphire laser using optogalvanic spectroscopy of silicon atoms", Opt. Lett. **31**, pp. 3037-3039 (2006).

【登録特許リスト】

- [1]熊谷 寛、緑川克美「原子のレーザー冷却方法およびその装置ならびに原子のレーザー冷却に用いるコヒーレント光源」、特願 2002-011558 (2002/01/21)、特開 2002-328199 (2002/11/15)。
- [2] 熊谷 寛、緑川克美「コヒーレント光源装置およびコヒーレント光の発生方法」、申請国：日本(特開)、米国(審査中)、EPC(審査中)、特願 2002-254096(2002/08/30)、特開 2004-093845 (2004/03/25)。