

平成21年5月20日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18360041

研究課題名（和文） シリコン原子波の位相制御技術の開発

研究課題名（英文） Technical Development of Phase Control of Silicon Atomic Waves

研究代表者

熊谷 寛 (KUMAGAI HIROSHI)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00211889

研究成果の概要：

シリコン原子をレーザー冷却すると、同位体分離できるだけでなく、初めて、シリコン原子から原子波としての振る舞いを引き出すことができる。原子波であれば、光と同じように空間的に位相制御でき、原子波ホログラフイーが実現できる。シリコン原子波の原子波ホログラフイー技術を開発する上で極めて重要な要素技術である、シリコン原子に共鳴できる単一周波数、高輝度ナノ秒深紫外コヒーレント光源の開発、同光源の周波数安定化技術、周波数走査技術、周波数微調技術の開発、さらには原子層堆積技術によりシリコン原子波ミラーの開発を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
19年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
20年度	3,100,000	930,000	4,030,000
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・量子光工学

キーワード：シリコン、原子波、レーザー、ミラー、位相制御

1. 研究開始当初の背景

1998年に豪国ニューサウスウェルズ大学の B.E. Kane が、シリコン量子コンピューティング素子を提案した。Kane の提案が注目された理由は、シリコン中に埋め込まれたリンイオンの核スピンの量子ビットを掌り、個別の核スピンの制御と読み書きの両方を可能にする構造になっていたためである。具体的には、個別の核スピンの対

する位相シフトは、上部電極に電圧を印加しながら核スピンに共鳴した電磁波を入射することで行い、またスピン状態の読み出しは、核スピンの状態による電極電子数変化をクーロンブロッケイドで検出することで行う。構造形成と読み出し技術の両面で現状技術の最先端が要求されるが、量子ビット数が増大した場合でも装置が複雑にな

らずにすむなど、固体方式の特徴的な利点を有しており、魅力的なアイデアである。爾来、量子通信路符号化や量子計算に必要な固体量子位相ゲートの実現が現実味を帯びてきた。日本でも、慶應義塾大学とスタンフォード大学が共同で、シリコン原子の同位体を利用した、シリコン量子コンピューティング素子の形態・動作原理を提案している。核スピンを持たない ^{28}Si ウエハー中に、 ^{29}Si 核スピンを周期的に配置する構造は、電極の作製や無理な不純物添加を必要とせず、ナノテクノロジー技術の発展で対応できる利点がある。シリコンウエハー上にモノリシックに作製できるため、現在のシリコン LSI 技術との融合が可能であり、高い展開性も有している。しかし通常固体中の核スピンは、周りの核スピンとのランダムな相互作用によって急速に緩和してしまうため、核スピン 0 の（例えば質量数 28 のシリコン同位体のみからなる）特殊な基板に配列・制御し埋め込むことが必要で、同位体半導体原子の高度な分離技術と配列技術が、大きな課題となっていた。

2. 研究の目的

シリコン原子をレーザー冷却すると、同位体分離できるだけでなく、初めて、シリコン原子から原子波としての振る舞いを引き出すことができる。“シリコン原子波工学”の始まりに繋がる。原子波であれば、光と同じように空間的に位相制御でき、原子波ホログラフィーが実現できる。シリコン原子波で原子波ホログラフィーが実現できれば、同位体シリコン原子を実像として空間的に配列できる技術に繋がる。したがって、シリコン原子波の原子波ホログラフィー技術を開発する上で極めて重要な要素技術である、シ

リコン原子に共鳴できる単一周波数、高輝度ナノ秒深紫外コヒーレント光源の開発、同光源の周波数安定化技術、周波数走査技術、周波数微調技術の開発、さらには原子層堆積技術によりシリコン原子波ミラーの開発を行なうことを目的とした。

3. 研究の方法

シリコン原子波用原子波ミラーの設計手法を確立し、研究代表者が開発した光学薄膜の原子層堆積手法で、原子波の位相制御に必要な原子波ミラーを開発する。さらに原子波ミラーの励起光源として、単一周波数 CW レーザーによるナノ秒レーザーの注入同期技術により高輝度な単一周波数ナノ秒深紫外コヒーレント光源を開発する。

4. 研究成果

(1) 単一周波数、高輝度ナノ秒深紫外コヒーレント光源の開発（世界初）。

シリコン原子波ミラー効果はレーザー励起エバネッセント電場を利用する。エバネッセント電場を励起するためには、高輝度な単一周波数ナノ秒深紫外コヒーレント光源が必要である。

① 単一周波数CWレーザーによる、ナノ秒チタンサファイヤレーザーの注入同期技術の開発

まず最初に、CW チタンサファイヤレーザーによるナノ秒チタンサファイヤレーザーの注入同期に成功した。シリコン原子の共鳴線に同調できるようにするためには、注入用の CW レーザーが狭線幅である必要であった。単一周波数波長可変 CW 半導体レーザー（波長 757nm 付近、波長可変、瞬時線幅 1MHz 以下）を用いて、ナノ秒チタンサファイヤレーザーの共振器に縦横モード整合を採る

ことで、効率よく注入同期を行なった。

② 共振器長動的制御による単一周波数ナノ秒チタンサファイヤレーザーの開発

狭線幅波長可変 CW 半導体レーザーの周波数は、シリコン原子共鳴線付近の固定周波数の 1/3 に同調させるため、ナノ秒チタンサファイヤレーザーの共振器長を動的制御して、共振器周波数を狭線幅波長可変 CW 半導体レーザーの周波数に一致させる必要があった。共振器から漏れてくるレーザー光からエラー信号を作り、高速 PID 制御により、動的制御を行い、全体として単一周波数ナノ秒チタンサファイヤレーザー光を発生させた。さらには非線形結晶により 3 倍波を発生させることで、直接シリコン原子に共鳴できるほどの、単一周波数ナノ秒深紫外コヒーレント光源を開発した。

③ 同位体半導体原子の原子スペクトル超微細構造の同定。

注入同期しない場合のシリコン原子（質量数 29）の精密原子分光はすでに実証済みである。共振器内部にエタロンを挿入したナノ秒チタンサファイヤレーザーの第 3 高調波による、レーザー冷却波長での光ガルバノ分光実験を行ったところ、スペクトル幅が数 GHz で、シリコンのドップラー広がりと同程度のレーザー線幅になっていることが判明した。既に開発した単一周波数深紫外コヒーレント・ナノ秒コヒーレント光源を用いて、同位体半導体原子の原子スペクトル超微細構造を世界で初めて明らかにした。

(2) 原子層堆積技術によりシリコン原子波ミラーの開発（世界初）。

① シリコン原子波の原子波ミラーの設計

ルビジウムなどの原子波ミラーの研究例はあるが、シリコン原子の原子波ミラーの研究例は今までに一例もない。ルビジウム

であれば、プリズムの反射面に銀コーティングするだけで良いが、シリコン原子の共鳴波長は 252nm の深紫外域なので、同様のコーティングでは強いエバネッセント場を発生できない。本研究で、世界で初めて、シリコン原子波の原子波ミラーを設計した。既に確立した設計手法から、原子波ミラーの透明基板にあたるプリズム面に低屈折率媒質層、高屈折率媒質層をコーティングすることで、高屈折率媒質層に光電界を閉じ込めることができ、表面に強いエバネッセント場を発生できることを明らかにした。媒質層の厚さの最適値は、マックスウェル方程式の境界条件から求めることができ、石英プリズムを用いた場合、ギャップ層として Al_2O_3 層、導波路層として HfO_2 層が最適であることがわかっており、シリコン原子の運動方程式から、原子線の原子ミラー表面近くの軌道を求めて、光強度に依って原子の反射面の高さ、つまり位相を制御できることを見いだした。媒質層の厚さの最適値を、マックスウェル方程式の境界条件から求め、原子波ミラーを設計した。併せて、シリコン原子波の位相制御効果を調べた。

② シリコン原子波ミラーの原子層堆積技術の開発

①で設計したシリコン原子波ミラーを作製するための、原子層堆積技術を開発した。シリコン原子波の原子波ミラー作製において、高屈折率材料の膜厚精度は 1nm 程度であり、膜厚の制御が極めて難しい。そこで、研究代表者が以前軟 X 線ミラー作製において開発した、酸化物の原子層堆積法を適応した。酸化物の原子層堆積法は例えば Al_2O_3 薄膜であれば、トリメチルアルミニウムガスと水蒸気もしくは過酸化水素ガスを交互に基板表面に供給する。トリメチルアルミニウムガス同士、または、水蒸気同士は、メチル基同士あるいは OH 基同士の反撥で一層分しか化学吸着さ

れない。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堆積させることができることを実証した。膜厚精度は 0.1nm と高いため、波長 2.7nm の軟 X 線ミラーとしても 20 層で 30%を超える反射率を実証できている。

③ シリコン原子波の原子ミラーの構造評価と性能評価

シリコン原子波の原子ミラーは透明誘電体の 2 層構造からできているので、既設の分光エリプソメーターを用い、設計通りの 2 層構造になっているか、構造評価を行なった。特に高誘電率層は、導波路として働いていた。導波路面から漏れてくる深紫外光強度を計測することで、設計通りの性能を発揮していることを明らかにした。シリコン原子波の空間的に位相制御を行なうために、励起深紫外光の強度を空間的に変調することが有効であることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 16 件)

- 1) Y. Aoki, Y. Shiomi, T. Yamamoto, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Nanosecond 389-nm coherent light source with injection seeding for nuclear spin polarization of ^3He atoms, *Proceedings of Photonics West 2009: LASE*, vol. 7193, pp. (CD-ROM), 2009, 査読有.
- 2) S. Maeda, Y. Tabata, H. Morioka, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Spin polarization of metastable ^3He atoms with 389-nm coherent light source, *Proceedings of Photonics West 2009: LASE*, vol. 7201, pp. (CD-ROM), 2009, 査読有.
- 3) Y. Shiomi, T. Yamamoto, H. Kumagai and A. Kobayashi, Single-frequency nanosecond-pulsed deep-ultraviolet coherent light source at 252 nm for manipulating silicon atoms resonantly, *Opt. Commun.*, vol. 281, pp. 3824-3826, 2008, 査読有.
- 4) S. Maeda, K. Kyutoku, H. Kumagai and A. Kobayashi, Optogalvanic spectroscopy using 389-nm coherent light source accurately tuned to resonance frequency of $2^3\text{S} \rightarrow 3^3\text{P}$ of ^3He , *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research- Section B*, vol. 266, pp. 2623-2626, 2008, 査読有.
- 5) Y. Shiomi, T. Yamamoto, H. Kumagai and A. Kobayashi, Isotopic manipulation of silicon atoms with atomic mirror, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research- Section B*, vol. 215, pp. 5047-5049, 2008, 査読有.
- 6) Y. Shiomi, T. Yamamoto, Y. Aoki and H. Kumagai, "Novel optogalvanic spectroscopy of semiconductor atoms with a frequency-tripled ns Ti:sapphire laser injection-seeded by cw frequency-scanning Ti:sapphire laser", *Proceedings of APLS2008-The 6th Asia Pacific Laser Symposium*, pp. (CD-ROM), 2008, 査読有.
- 7) T. Yamamoto, Y. Shiomi, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Frequency stabilization of nanosecond deep-ultraviolet coherent light source with injection seeding, *Proceedings of SPIE*, vol. 6871, pp. (CD-ROM), 2008, 査読有.
- 8) Y. Shiomi, T. Yamamoto, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Fine spectroscopy of semiconductor atoms for controlling nuclear spins, *Proceedings of SPIE*, vol. 6905, pp. (CD-ROM), 2008, 査読有.
- 9) 塩見康友, 久徳邦明, 熊谷 寛, シリコン原子波操作のためのナノ秒パルス深紫外コヒーレント光源の注入同期性能, *電気学会論文誌*, vol. C 127・9, pp. 1346-1347, 2007, 査読有.
- 10) 塩見康友, 熊谷 寛, 原子ミラーを用いた同位体シリコン原子の運動制御, *電気学会論文誌*, vol. C 127・9, pp. 1348-1349, 2007, 査読有.
- 11) 熊谷 寛, 2 波長同時共振型の CW 深紫外和周波発生における周波数精密制御, *電気学会論文誌*, vol. C 127・9, pp. 1350-1351, 2007, 査読有.
- 12) K. Kyutoku, S. Maeda, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Frequency doubling of ps Ti:sapphire laser with PPMgLN waveguide for spin polarization of ^3He ", *Proceedings of SPIE*, vol. 6455, pp. (CD-ROM), 2007, 査読有.
- 13) Y. Shiomi, H. Kumagai, T. Yamamoto, and A. Kobayashi, Single-frequency stabilization of frequency-tripled nanosecond Ti:sapphire laser injection-seeded for silicon atom optics, *Proceedings of SPIE*, vol. 6451, pp. (CD-ROM), 2007, 査読有.
- 14) T. Fujimoto, Y. Shiomi, H. Kumagai, and

- A. Kobayashi, Atomic layer deposition of atomic mirror for silicon, Proceedings of SPIE, vol. 6458, pp. (CD-ROM), 2007, 査読有.
- 15) H. Kumagai, Fine frequency tuning in sum-frequency generation of continuous-wave single-frequency coherent light at 252 nm with dual-wavelength enhancement, Opt. Lett., vol. 32, pp. 62-64, 2007, 査読有.
- 16) 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., vol. 31, pp. 3037-3039, 2006, 査読有.
- [学会発表] (計31件)
- 1) 熊谷 寛, 高フィネス外部共振器による高効率波長変換, 平成 20 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティブ・マテリアルの開拓」シンポジウム, 2009 年 2 月 5 日, 大阪.
- 2) 山本 毅、塩見康友、青木優太、霜野貴也、熊谷 寛、小林 中、フィゾー干渉計による単一周波数ナノ秒パルス紫外コヒーレント光源の性能評価, 平成 20 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティブ・マテリアルの開拓」シンポジウム, 2009 年 2 月 5 日, 大阪.
- 3) 森岡洋史、前田真吾、熊谷 寛、小林 中、高効率波長変換による単一周波数 389 nm コヒーレント光の発生, 平成 20 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティブ・マテリアルの開拓」シンポジウム, 2009 年 2 月 5 日, 大阪.
- 4) S. Maeda, Y. Tabata, H. Morioka, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Spin polarization of metastable 3He atoms with 389-nm coherent light source, *Proceedings of Photonics West 2009: LASE*, 2009 年 1 月 29 日, San Jose, USA.
- 5) Y. Aoki, Y. Shiomi, T. Yamamoto, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Nanosecond 389-nm coherent light source with injection seeding for nuclear spin polarization of ³He atoms, *Photonics West 2009: LASE*, 2009 年 1 月 26 日, San Jose, USA.
- 6) 青木優太、塩見康友、山本 毅、熊谷 寛、小林 中、単一周波数 252nm ナノ秒パルス光を用いたシリコン原子の光ガルバノ分光, 第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008 年 9 月 2 日, 名古屋.
- 7) 青木優太、塩見康友、山本毅、熊谷寛、小林中、注入同期深紫外コヒーレント光源による半導体原子の精密原子分光, 平成 19 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティブ・マテリアルの開拓」シンポジウム, 2008 年 2 月 5 日, 大阪市立大学.
- 8) 青木優太、塩見康友、山本毅、熊谷寛、小林中、周波数走査型注入同期ナノ秒パルス深紫外コヒーレント光源による半導体原子分光, レーザー学会学術講演会第 28 回年次大会, 2008 年 2 月 1 日, 名古屋国際会議場.
- 9) Y. Shiomi, T. Yamamoto, Y. Aoki, and H. Kumagai, Novel optogalvanic spectroscopy of semiconductor atoms with a frequency-tripled ns Ti:sapphire laser injection-seeded by cw frequency-scanning Ti:sapphire laser, APLS2008-The 6th Asia Pacific Laser Symposium, 2008 年 2 月 1 日, 名古屋国際会議場.
- 10) Y. Shiomi, T. Yamamoto, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Fine spectroscopy of semiconductor atoms for controlling nuclear spins, SPIE-The International Society of Optical Engineering、PHOTONICS WEST08, 2008 年 1 月 21 日, 米国サンノゼ.
- 11) T. Yamamoto, Y. Shiomi, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Frequency stabilization of nanosecond deep-ultraviolet coherent light source with injection seeding, SPIE-The International Society of Optical Engineering、PHOTONICS WEST08, 2008 年 1 月 20 日, 米国サンノゼ.
- 12) 山本毅、塩見康友、熊谷寛、小林中、注入同期型ナノ秒深紫外コヒーレント光源の安定化技術の開発, 第 68 回応用物理学会学術講演会, 2007 年 9 月 8 日, 北海道工業大学.
- 13) Y. Shiomi, T. Yamamoto, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Development of a Single-Frequency Nanosecond Pulsed Deep-UV Coherent Light Source for Manipulating Silicon Atoms, CLEO/QELS2007, 2007 年 5 月 8 日, 米国ボルチモア.
- 14) 熊谷 寛、 “逐次的表面化学反応による X線ミラーの作製”、平成 18 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティブ・マテリアルの開拓」シンポジウム、2007 年 2 月 1 日, 大阪市立大学.
- 15) 藤元俊彦、塩見康友、熊谷 寛、小林 中、 “逐次的表面化学反応による原子ミラー作製技術の開発”、平成 18 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティ

- ブ・マテリアルの開拓」シンポジウム、2007年2月1日、大阪市立大学。
- 16) 増田裕亮、藤元俊彦、熊谷 寛、小林 中、“「水の窓」領域アト秒ミラーのデザイン”、平成 18 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティブ・マテリアルの開拓」シンポジウム、2007年2月1日、大阪市立大学。
- 17) 塩見康友、山本 毅、熊谷 寛、小林 中、“シリコン原子光学のための注入同期型単一周波数ナノ秒深紫外コヒーレント光源の開発”、平成 18 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティブ・マテリアルの開拓」シンポジウム、2007年2月1日、大阪市立大学。
- 18) 久徳邦明、熊谷 寛、小林 中、“ピコ秒チタンサファイアレーザーの第 2 高調波を用いたヘリウム準安定原子の光ポンピング効果”、平成 18 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティブ・マテリアルの開拓」シンポジウム、2007年2月1日、大阪市立大学。
- 19) 山本 毅、塩見康友、熊谷 寛、小林 中、“ナノ秒チタンサファイアレーザーの注入同期とその安定化技術”、平成 18 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティブ・マテリアルの開拓」シンポジウム、2007年2月1日、大阪市立大学。
- 20) 前田真吾、久徳邦明、熊谷 寛、小林 中、“BiBO 外部共振器による CW チタンサファイアレーザーの第 2 高調波発生”、平成 18 年度大阪市立大学重点研究「ヒューマンアダプティブ・マテリアルの開拓」シンポジウム、2007年2月1日、大阪市立大学。
- 21) T. Fujimoto, Y. Shiomi, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Atomic layer deposition of atomic mirror for silicon, LASE2007, 2007年1月22日, 米国サンノゼ。
- 22) Y. Shiomi, T. Yamamoto, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Single-frequency stabilization of frequency-tripled nanosecond Ti:sapphire laser injection-seeded for silicon atom optics, LASE2007, 2007年1月22日, 米国サンノゼ。
- 23) K. Kyutoku, S. Maeda, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Frequency doubling of ps Ti:sapphire laser with PPMgLN waveguide for spin polarization of ^3He , LASE2007, 2007年1月22日, 米国サンノゼ。
- 24) 増田裕亮、藤元俊彦、熊谷 寛、小林 中、“コヒーレント軟X線光学素子作製に向けた NiO/TiO 超格子構造の設計”、レーザー学会学術講演会第 27 回年次大会、2007年1月17日、宮崎。
- 25) 山本 毅、塩見康友、熊谷 寛、小林 中、“注入同期によるナノ秒深紫外コヒーレント光源の単一周波数化”、レーザー学会学術講演会第 27 回年次大会、2007年1月17日、宮崎。
- 26) 前田真吾、久徳邦明、熊谷 寛、小林 中、“高効率波長変換による単一周波数 389nm コヒーレント光の発生”、レーザー学会学術講演会第 27 回年次大会、2007年1月17日、宮崎。
- 27) 熊谷 寛、“単一周波数深紫外コヒーレント光源の開発”、レーザー学会学術講演会第 27 回年次大会、2007年1月17日、宮崎。
- 28) 熊谷 寛、“深紫外単一周波数コヒーレント光源の開発”、電気学会「光・量子場が関わるナノサイエンステクノロジー」研究会、2006年12月15日、金沢。
- 29) 塩見康友、久徳邦明、熊谷 寛、小林 中、“注入同期深紫外コヒーレント光源の性能評価”、第 67 回応用物理学会学術講演会、2006年8月29日、滋賀。
- 30) 藤元俊彦、塩見康友、熊谷 寛、小林 中、“原子層堆積法による原子ミラー作製技術の開発”、第 67 回応用物理学会学術講演会、2006年8月29日、滋賀。
- 31) Y. Shiomi, K. Kyutoku, H. Kumagai, and A. Kobayashi, Development of an Injection-Seeded Nanosecond Pulsed Deep-UV Coherent Light Source for Controlling Silicon Atomic Waves, CLEO2006, 2006年5月26日, 米国ロングビーチ。

6. 研究組織

(1)研究代表者

熊谷 寛 (KUMAGAI HIROSHI)
 大阪市立大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：00211889

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし