

ワイドギャップ窒化物半導体による量子情報処理システム開発



研究ノート

片山 竜二*

Development of Quantum Information Processing Systems
using Widegap Nitride Semiconductors

Key Words : Quantum Optics, Optical Waveguides, Widegap Semiconductors

はじめに

量子計算機の開発状況： 近年膨大な情報伝送・処理における計算速度向上の要請に反し、ムーア則は限界を迎えた。これに対し量子計算機は量子重ね合わせ状態を用いた超並列演算により、速度飽和を解決できる。2011年に磁束量子ビット型量子計算機が初めて市販化され¹⁾、その性能に期待が高まった。ただし専用計算機²⁾のため任意アルゴリズムの実装が不可能で、価格15億円、動作温度15mK、許容磁場は地磁気の1/50等と普及を阻む要素が多い。これに続く形でIBM³⁾、Google⁴⁾、Microsoft⁵⁾、Intel⁶⁾など大手企業は、任意アルゴリズムを実装可能な汎用量子計算機を本命とし独自に開発を進めている。IBMは2016年にクラウドサービス提供を開始⁷⁾し、MicrosoftはVisual Studio[®]等汎用言語の量子計算機用API・SDKを2017年に公開⁵⁾する等、その商用化への動きが本格化している。

光を用いた量子計算機： 上記量子計算機は何れも極低温での動作を強いられるが、種々の量子状態のうち、光を用いる系は室温でも緩和時間が長く量子計算に適し有力視される。現在開発されている光を用いた量子計算機は、離散変数型と連続変数型の二種に大別される。前者は光パラメトリック下方変換(OPDC)により生成された単一光子対間の量子干渉とそれらの伝搬経路により符号化を行う。こ

の原理により竹内らは、ビームスプリッタ等の線形光学部品だけを用いた量子ゲート動作を実証⁸⁾した。この系は微弱な単一光子状態を複数経路に振り分け符号化するため計算成功率が低いが、量子アルゴリズムの実装も報告⁹⁾された。また後者では古澤らは光パラメトリック共振器(OPO)で生成したスクイーズド状態を利用し、多体量子もつれ状態生成¹⁰⁾、更に一万個以上の超大規模量子もつれ状態生成¹¹⁾に成功し、大規模化への糸口を拓いた。また2017年にはNTTと国立情報学研究所が国産初の量子情報処理システム実証に成功^{12,13)}した。アルゴリズムの制限がある一方、古澤らと同様のスクイーズド光を用いた、室温動作する画期的な提案と言える。

ただしこれらは何れも室温動作という絶対的な利点を有する一方、自由空間光学系による定盤上の実験であり、ビット数拡張に伴う巨大化や、光軸合わせ難度や安定性の極端な悪化が懸案である。そこで今後は、光導波路化等、小型・安定動作化・スケラビリティ・再構成の実現といった、実用化を目指した実装技術開発が要請されている。

光導波路化の要請： 光を用いた量子情報処理システムは、量子光源と励起光源、量子回路並びに光検出器から構成される。O'Brienらはこのうち量子回路をSiO₂光導波路型マッハツェンダ干渉計(MZI)により実装し、量子アルゴリズムの動作実証¹⁴⁾と、100個以上の干渉計を集積した多ビット・再構成可能な量子計算を実証した¹⁵⁾が、これらの制御は熱光学効果に依り動作速度が極めて遅い。また連続変数型システムでもSiO₂光導波路により量子回路と検出部を集積し量子もつれ状態生成に成功¹⁶⁾したが、高速応答を要する制御機構の小型化は達成出来ていない。

また肝心の励起光源や量子光源は、何れの報告例でも依然大型・高価なレーザとバルク波長変換結晶



* Ryuji KATAYAMA

1974年9月生まれ
東京大学 大学院工学系研究科 物理工学専攻 博士課程中途退学(2001年)
現在、大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻 電子工学コース
教授 博士(科学) 結晶工学、量子光学
TEL: 06-6879-7772

E-mail: katayama.ryuji@eei.eng.osaka-u.ac.jp

に頼る現状である。まず量子光源を光導波路型素子に置き換えると、パワー密度向上に伴い量子光源の発生効率が劇的に向上し、高出力・大型な励起光源を低出力な小型レーザに置き換え可能となる。また共振器構造が不要、シングルパス化が可能となるため、波長制御機構や冗長な共振器、精密な光軸合わせも一切不要となり劇的な簡略化と安定動作化が期待できる。実際に平野らは、量子光源を光導波路によりシングルパス化し、スクイーズド光発生¹⁷⁾、量子もつれ状態生成¹⁸⁾、量子テレポーテーション実証¹⁹⁾に成功したが、励起光源と量子回路は依然として巨大である。

本研究室における研究開発項目： 本研究室では、現在自由空間光学系で実装される量子情報処理システムの全ての構成要素を光導波路により実装する新規手法を提案している。特に InGa_N レーザによる小型励起光源、光導波路からなるシングルパス型量子光源、(Al,Ga)_N チャネル光導波路型量子回路の作製を進めており、それらを集積した光導波路型システムの動作実証を目指している。

光導波路型励起光源の開発

高感度・低雑音・低価格な Si 検出器での検出が大前提となり、かつ OPDC により発生する場合は、400 nm 帯 InGa_N レーザが励起光源の候補となる。量子光源の要請から単一モード化とモードロック化が必要であり、下記の二種類のレーザ構造の新規開発を進めている。

波長可変単一モード InGa_N レーザ： まず離散変数型システムに用いる縮退 OPDC 過程の要請から、深溝分布ブラッグ反射鏡 (DBR) を装荷した波長可変単一モードレーザを新規開発している。本研究室では As・P 系レーザの単一モード波長可変動作と光集積回路応用を実証しており^{20,21)}、現在この技術を用いた InGa_N レーザ作製を進めており、作製困難な一次結合 DBR や再成長プロセスに代えて、長周期高次結合 DBR によるプロセスの簡略化と、DBR 領域への電流注入による波長可変化を狙っている。

モード同期 InGa_N レーザ： 一方で連続変数型システムでは、強励起によるスクイージングレベル向上と、高繰り返しパルス符号化の要請から、モード同期化を要する。宮嶋らは既に 405 nm 帯にお

ける 1 GHz の高繰り返し周期パルス発振²²⁾ならびに外部共振器による時間幅 200 fs、出力 4.4 W のモード同期発振²³⁾を実証している。本研究では、上記同様の深溝 DBR を用いての実装を進めている。

光導波路型量子光源の開発

既報の量子計算における量子光源にはバルク非線形光学結晶が用いられる。光導波路型デバイスにおいても、拡散プロセスにより形成するため断面積が広く、効率向上のため長尺化や共振器化を要する。そこで本研究室では断面積を一桁縮小可能なチャネル光導波路型デバイスを提案し、短尺化とシングルパス化を検討している。

強誘電体 / AlN 光導波路： 本積層構造は薄膜転写プロセスもしくはエピタキシャル成長を用いた作製を検討している。特に前者は、強誘電体ウエハに剥離用犠牲層を形成後、AlN 層と接合し、熱処理により剥離し強誘電体薄膜を転写するという工程により作製する。この技術を用いた LiNbO₃/SiO₂ の接合とチャネル光導波路形成は栖原らにより近年実証されており^{24,25)}、本研究ではこの技術を発展させ、絶縁性の SiO₂ に代えて導電性の AlN を用いた光導波路作製を行う。本研究室では高速原子ビーム表面活性化接合装置を用いて既に LiNbO₃ と AlN 薄膜の接合に成功しており^{26,27)}、現在は薄膜転写条件を検討している。

極性反転 AlN/AlN・Ga_N/Ga_N 光導波路： 上記の強誘電体 / AlN 量子光源の機能は強誘電体の強い光学非線形性に依る。一方でワイドギャップ窒化物半導体も強誘電体に匹敵する強い光学非線形性を呈する²⁸⁻³²⁾。実際に筆者らはエピタキシャルに周期的極性反転³³⁻³⁸⁾させた Ga_N 光導波路からの青紫色第二高調波発生 (SHG) に成功^{39,40)}しており、現在は極性反転 AlN/AlN、Ga_N/Ga_N 光導波路による OPDC 量子光源の作製を進めている。ここで、窒化物半導体は常誘電体のため一旦結晶方位が定まると電界印加では分極反転できず、位相不整合により OPDC は実現しない。そこで、本構造はエピタキシャル成長による極性反転⁴¹⁻⁴³⁾もしくは先述の薄膜転写プロセスを用いた作製を検討している。その際、光波伝搬方向に沿って周期極性反転する従来型の縦型疑似位相整合 (QPM) 構造ではなく、積層方向に極性反転する横型 QPM 構造を用いる^{44,45)}。

詳細は紙面の都合により割愛するが、従来の縦型 QPM 構造と同等の効率を持つにも関わらず、作製が極めて容易である。実際に、表面活性化接合と基板剥離^{26,27)}および高温アニールによる接合と基板剥離に成功^{46,47)}しており、現在はチャネル光導波路の形成を進めている。

光導波路型量子回路の開発

量子光源との集積を目指し、共通の積層構造によるチャネル光導波路型量子回路の実装を検討し、基本素子である方向性結合器と高速位相変調可能な電界印加による位相変調器を組み合わせて量子回路を構成する。

GaN 方向性結合器： 量子回路は基本素子である MZI により構成され、所望のクロスポート間結合比 (透過率) の方向性結合器を用いる。実際に、二本の GaN チャネル導波路を近接配置した方向性結合器⁴⁸⁾を形成し、任意のクロスポート間結合比の作製に成功⁴⁹⁾した。現在は電気光学効果による位相変調と MZI の動作実証を進めている。

量子ゲート作製と大規模化： 今後は離散変数型量子回路として MZI を組み合わせた経路符号化型の制御ノット量子ゲートの実装と量子回路の大規模化・再構成可能化の実証を行う。また連続変数型の系も作製し直交スクイーズド状態を用いた量子計算を実証し、高速な電気光学位相変調器で駆動する光スイッチを用いて、高繰り返し周波数化による時間領域での多ビット化を狙う。

おわりに

本稿では、ワイドギャップ窒化物半導体の量子情報処理システムへの応用展開を目指して、光導波路で実装する新たなプラットフォームの開発状況を紹介した。この進展により、系の小型化・簡略化・安定動作化・アライメントフリー化が見込まれ、従来例のない大規模・再構成可能なシステムによる量子アルゴリズム実装への展開が期待される。

謝辞 本稿で紹介した研究開発の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 A (17H01063)、新学術領域研究 (研究領域提案型) 特異構造の科学 (17H05335, 16H06415, 16H06416)、挑戦的研究 (萌芽) (17K19078) の助成を受けて実施され、また大

阪大学 藤原研究室・森研究室, 三重大学 三宅研究室, 名城大学 赤崎・岩谷・宮嶋研究室, 東京大学 近藤研究室, 名古屋大学 天野研究室, 東北大学 松岡研究室との共同研究である。

参考文献

- 1) www.dwavesys.com
- 2) T. Kadowaki *et al.*, Phys. Rev. E **58**, 5355 (1998).
- 3) www.research.ibm.com/ibm-q/
- 4) C. Neill *et al.*, arXiv:1709.06678.
- 5) www.microsoft.com/en-us/quantum/
- 6) newsroom.intel.com/press-kits/quantum-computing/
- 7) quantumexperience.ng.bluemix.net/qx/experience
- 8) H. F. Hofmann *et al.*, Phys. Rev. A **66**, 024308 (2002).
- 9) X. D. Cai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 230501 (2013).
- 10) T. Aoki *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 080404 (2003).
- 11) S. Yokoyama *et al.*, Nature Photon. **7**, 982 (2013).
- 12) T. Inagaki *et al.*, Science **22**, (2017).
- 13) qnncloud.com
- 14) A. Politi *et al.*, Science **325**, 1221 (2009).
- 15) J. Carolan *et al.*, Science **349**, 711 (2015).
- 16) G. Masada *et al.*, Nature Photon. **9**, 316 (2015).
- 17) Y. Eto *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, L821 (2006).
- 18) Y. Eto *et al.*, Phys. Rev. A **79**, 050302(R) (2009).
- 19) Y. Eto *et al.*, Opt. Express **19**, 1360 (2011).
- 20) M. Uemukai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 020205 (2012).
- 21) A. K. Saha *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 08RH01 (2016).
- 22) T. Miyajima *et al.*, Appl. Phys. Lett. **94**, 161103 (2009).
- 23) S. Kono, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 08JG06 (2013).
- 24) K. Tanaka *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **54**, 128002 (2015).
- 25) www.nanoln.com/en/
- 26) T. Onodera *et al.*, IWUMD-2017, Th-P29 (2017).
- 27) 小野寺卓也 他, 第 65 回応用物理学会春季学術

- 講演会, 17a-E202-2 (2018).
- 28) M. Abe *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **27**, 2026 (2010).
- 29) X. C. Long *et al.*, Appl. Phys. Lett. **67**, 1349 (1995).
- 30) J. Miragliotta *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **10**, 1447 (1993).
- 31) T. Fujita *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 2610 (2000).
- 32) Y. Fujii *et al.*, Appl. Phys. Lett. **31**, 815 (1977).
- 33) R. Katayama *et al.*, J. of Cryst. Growth **301-302**, 447 (2007).
- 34) R. Katayama *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 231910 (2006).
- 35) Y. Fukuhara *et al.*, phys. stat. sol. (c) **7**, 1922 (2010).
- 36) R. Katayama *et al.*, Appl. Phys. Lett. **91**, 061917 (2007).
- 37) H. M. Ng *et al.*, Jpn. J. of Appl. Phys. **2**, 42 (2003).
- 38) A. Chowdhury, H. M. Ng, M. Bhardwaj and N. G. Weimann, Appl. Phys. Lett. **83**, 1077 (2003).
- 39) R. Katayama *et al.*, Proc. of SPIE **8268**, 826814 (2012).
- 40) R. Katayama *et al.*, IWN2012, PR5-1 (2012).
- 41) R. Katayama *et al.*, Physica E **32**, 245 (2006).
- 42) K. Balakrishnan *et al.*, J. of Cryst. Growth **189-190**, 244 (1998).
- 43) J. Ohta *et al.*, Appl. Phys. Lett. **83**, 3075 (2003).
- 44) H. Ito *et al.*, Opt. Lett. **2** (6), 139 (1978).
- 45) 山口修平 他, 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 7p-A301-4 (2017).
- 46) Y. Hayashi *et al.*, IWUMD-2017, We-12 (2017).
- 47) Y. Hayashi *et al.* Appl. Phys. Express **11**, 031003 (2018).
- 48) Y. Zhang *et al.*, Appl. Phys. Lett. **99**, 161119 (2011).
- 49) 三輪純也 他, 第65回応用物理学会春季学術講演会, 17a-E202-3 (2018).

