

次世代デバイスのためのフォトニクス・イノベーション

(科学技術振興機構) ○佐藤勝昭

Photonics Innovation for Next-Generation Devices / Katsuaki Sato, (Japan Science and Technology Agency) /

Semiconductor LSI device technology is facing a limitation of miniaturization, such as energy consumption and transmission delay in metallic interconnections. Optical interconnection has been investigated to solve the problem. In this presentation I will introduce some of the achievements of the JST-PRESTO project “Materials and Processes for Next Generation Devices” with a particular reference to the photonics innovation, such as a Si Raman laser, a high sensitivity Ge photo-detector, a room-temperature quantum information device, and a nonlinear optical element using GaN.

問合せ先 : katsuaki.sato@nifty.com

はじめに：CMOS を超える次世代デバイスの要素技術としてフォトニクスの利用が期待されている。Si ラマンレーザ、高感度 Ge 光検出素子、室温動作するダイヤモンド量子情報デバイス、光応答性単電子デバイス、GaN 非線形光学素子など、JST さきがけ「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」領域の成果を中心にフォトニクスにおける最近のイノベーションを紹介する。

1) **Si ラマンレーザ**：シリコン集積回路の大規模化・高機能化にともない金属配線での信号遅延と消費電力が深刻化している。この解決手段として光電子集積回路が注目されるが、間接遷移型半導体である Si はレーザ動作や光増幅の実現が困難なため、III-V 族半導体との混載が模索されてきた。2002 年インテルは誘導ラマン散乱を用いる光増幅方法を提案し、2005 年 Si リブ型導波路を用いた Si ラマンレーザを開発したが cm サイズと大きく、チップ内配線にはほど遠いものであった。本領域の高橋研究者は、Q 値の高いフォトニック結晶をナノサイズ共振器として用いることによるラマンレーザを提案した。Si のラマンシフトと一致した 15.6 THz の周波数差を持ち、可能な限り高い Q 値を持ち、微小体積だけでなく高いラマン散乱確率が得られる電磁界分布を持つ 2 つの共振モードを合わせ持つ構造が必要で、電磁界計算から入射側には奇パリティの電磁界分布を有し、出射側には偶パリティの電磁界分布を有する場合に、強い結合が生じてラマンレーザが実現することを予測し、フォトニック結晶構造を設計・作製した。この結果、インテルデバイスの 1 万分の 1 以下のサイズと、1 万分の 1 以下のエネルギーで動作する Si ラマンレーザを実現した¹⁾。これは Si 光配線に大きな革新をもたらすもので、世界的に注目されている。

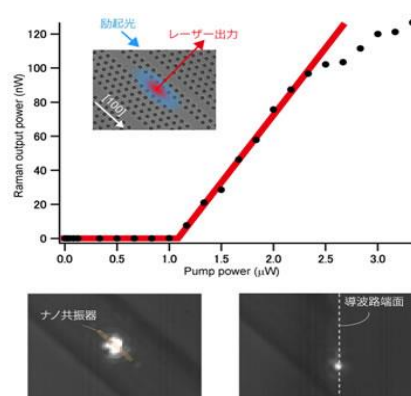


Fig.1(a) Input-output characteristic of Si Raman laser. Lasing is observed with threshold power of 1μW. (b) Photographs of the light emitted from the device.

2) **Ge 光集積回路**：従来、Ge の n 型 MOS トランジスタは性能が悪く、Ge で CMOS は作れないと考えられていた。その原因は、イオン注入ドーピングの損傷を通じたリークと界面の不活性化の困難さにあった。本領域の竹中研究者は、高温熱酸化で形成した GeO₂ によって Ge MOS 界面を不活性化するとともに、イオン注入法に比し低損傷の気相拡散法で形成したソース/ドレイン接合を用いたトランジスタを作製することによって、これらの課題を解決し、世界最高の 5 桁以上のオン・オフ比をもち Si を上回る実効移動度を示す高性能 Ge n 型 MOS トランジスタを実現することに世界で初めて実証した²⁾。次に、気相ドーピング法と熱酸化 GeO₂ による Ge 表面不活性化技術を Ge フォトディテクタに適用し、これまで実用化の障害になっていた接合リーク電流を Fig.2 に示すように、従来法と比較して 2 桁程度抑制し、素子面積が小さい導波路型フォトディテクタにおいて 1 nA 以下の暗電流が実現可能であることを世界で初めて示した³⁾。さらに、酸化濃縮を用いて高品位 Ge 膜を Si 基板上に集積する技術の確立にも成功したので、光配線 Ge LSI を実現するすべての要素技術が準備された。

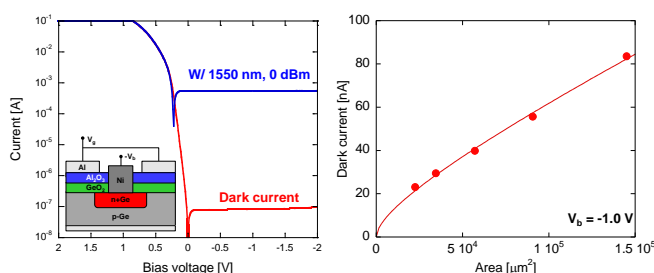


Fig.2 Diode characteristic and dark-current of GeO₂/Ge photodetector

3) **室温動作する光量子情報デバイス**：これまでの量子情報通信技術では、単一光子源として極低温に冷却する必要がある量子ドットや有機分子を用いてきた。本領域の水落研究者は、ダイヤモンドに含まれる NV 中心（窒素と炭素空孔の複合欠陥）の束縛エネルギーが室温の熱エネルギーより十分大きく室温で

動作することに着目、産総研の協力により作製したダイヤモンド LED(高品位の人工ダイヤモンド薄膜を p 型および n 型の人工ダイヤモンドで挟んだ pin 接合 LED)において、電流注入で NV 中心を発光させ、室温における単一光子発生の電氣的な制御に世界で初めて成功した⁴⁾。これは、量子情報通信実現を加速すると期待される大きな成果である。同研究者は、さらに ¹³C 核スピンを用いることにより量子ビット数を増やせると着想し、多量子ビット化研究を行った。本研究では核スピン 3 つと電子スピン 1 つの 4 量子ビットからなる系における量子もつれ状態の生成に成功した⁵⁾。固体系における量子もつれを生成した量子ビット数としては最高数である。

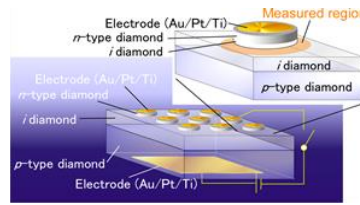


Fig.3(a) Structure of the diamond LED

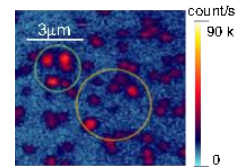


Fig.3(b) Current-driven single photon emission from the NV-center in diamond LED

4) **光応答性単電子デバイス**：さきがけ「次世代デバイス」の中岡研究者は、従来の自己形成量子ドットで困難であった単電子伝導と発光制御を両立させる横型素子、および単一光子発生と電子制御を両立させる縦型素子の 2 種類の素子を作製した。Fig.4 の横型素子においては、発光効率を高めるため、量子ドットを通常の発光素子と同様バリア層中に埋め込んだ。この状態での電気コンタクトが課題であったが、微小金属拡散技術によって電極とドットの間

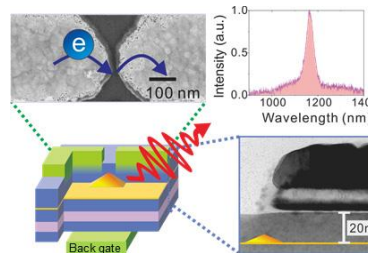


Fig.4 Schematic illustration of lateral QD device and photoluminescence spectrum

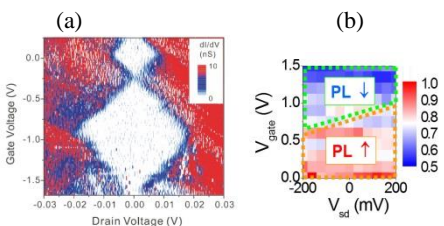


Fig.5 (a) Coulomb diamond of the lateral QD device, (b) Bias-dependence of PL intensity

間にトンネル接合をつくることにより電流注入発光に十分な電流密度を確保し良好な発光特性を示す単電子トンネル伝導素子の製作に成功した⁶⁾。Fig.5 にはこの素子の単電子動作を示すクーロンダイヤモンドと、光特性を示してある。一方、縦型素子においては、単一光子発生を確認するとともに、サイドゲートにより発光波長が制御できることを確認した⁷⁾。単一光子発生と電子制御の両立を実現した画期的な成果です。サイドゲート制御型量子ドット単一光子素子は「離れた 2 素子間の量子もつれ」生成素子に応用できる。量子情報通信の中継器には 2 素子間の 2 光子間量子干渉を使うが、これまで波長を一致させることが困難なため干渉の実現が困難であったが、今回開発した波長可変素子によってこれが達成できるようになり、長距離量子情報通信に道を開いた。

5) **GaN 非線形光学素子**：第 2 高調波発生(SHG)や和周波発生(SFG)など非線形光学現象を発現させるためには位相整合が必要である。通常使われる強誘電体では、互いに逆極性の分極をもつドメインを配列した縦型 QPM(疑似位相整合)が使われる。さきがけ「次世代デバイス」の片山研究者は、極性半導体 GaN において縦型 QPM を実現するため、Fig.6 に示すように、GaN 薄膜の結晶方位の表裏(±c 配向、ひいては非線形分極の符号)をエピタキシャルに制御する技術

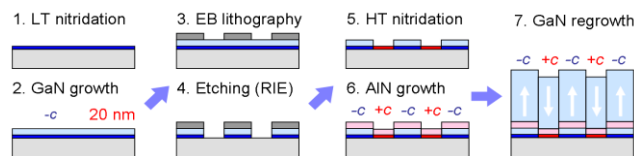


Fig.6 Fabrication process of periodic polarity-inverted GaN waveguides GaN device

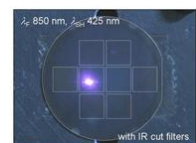


Fig.7 Photograph of SHG emission

を確立した。この技術を用いて、導波方向に沿う方向に周期的分極反転を導入することで、基本波・高調波の最低次導波モード間の位相不整合を補償し、Fig.7 のような強い可視光 SHG を実現した⁸⁾。

¹ Y. Takahashi et al. Nature **498**, 470–474 (2013)

² K. Morii, M. Takenaka, et al.: IEEE Electron Dev., **31** [10] 1092 - 1094 (2010)

³ M. Takenaka et al., Optics Express, **20** [8] 8718-8725 (2012)

⁴ N. Mizuochi, et al.: Nature Photonics, **6**, 299-303 (2012)

⁵ N. Mizuochi, et al.: SSDM 2012, Kyoto, Japan, (2012/9/25-27).

⁶ T. Nakaoka, et al.: AIP Advances **2**, 032103 (2012).

⁷ T. Nakaoka, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **51**, 02BJ05 (2012).

⁸ R. Katayama, et al.: Proc. SPIE 826814 (2012).