

産学協働の広場

企業と大学の課題相談会

3月15日(水) 13:30~17:00 (@展示ホールB会場)

「産学協働の広場」とは、産の課題と学・官の新技术を産学官の研究者が共有する場として、春秋の応用物理学会学術講演会時に開催される産学協働研究会主催のイベントです。ここでは、2017年春季講演会にて提示参加予定の2つの企業課題を紹介し、春季講演会でのイベント詳細は、産学協働研究会のホームページ <https://annex.jsap.or.jp/IAP/> をご参照ください。

フリッカノイズをサイエンスに 量子カスケードレーザーの事例

林 昌平, 廣畑 徹, 山西 正道 (浜松ホトニクス株式会社)

現在、電子デバイス・受発光デバイスなどで普遍的に観測されるフリッカノイズであるが、そのメカニズム解明や制御については、ほとんど手が付けられていないのが現状である。また、これまでノイズの扱われ方は、“Spontaneous fluctuations seem nothing but an unwanted evil which only an unwise experimenter would encounter!”¹¹ といった言葉に代表されるように、ほとんど無視されてきたと言っても過言ではない。ノイズ抑制の取り組みは地味である。しかし、そこにはあらゆるデバイスの特性を大幅に改善できる可能性が秘められている。そこで私たちは、量子カスケードレーザー (Quantum Cascade Laser: QCL) におけるフリッカノイズについて、そのメカニズムの解明と、その制御に取り組んでいる。

QCL は、その本質的な線幅が通常の半導体レーザーと比較して十分小さい (260 Hz @ 300 K) ことが、理論的に、また実験的に証明されている^{12, 3}。だが、実際のフリーランニングの QCL の線幅は大きく広がってしまっている (ただし、依然として通常の半導体レーザーよりは小さい)。これは、フリッカノイズが QCL の線幅に悪影響を及ぼしているからである。そこで、このフリッカノイズを制御 (抑制) することで、レーザーの線幅を大幅に改善することが期待される。

フリッカノイズの起源は電気的な揺らぎ (電流・電圧揺らぎ) であり、そこからパ

ワーの揺らぎに変換され、それが温度揺らぎとなり屈折率揺らぎを発生させることで最終的に周波数揺らぎとなって線幅に悪影響を及ぼす。ゆえに、問題の根本である電気的なフリッカノイズを抑制することで、光学的な制約なしに (フリーランニングで) レーザーの線幅を狭めることができると考えている。

私たちは、QCL の本質的な電気的なノイズは QCL の注入層のドーピングに起因していることを明らかにした^{14, 5} (このドーピングは QCL の動作のためには必要不可欠である)。その機構は以下のように説明できる。

ドーピングにより形成された不純物準位は、インジェクタ内のミニバンドとの間でキャリアの励起と緩和を繰り返す。これにより素子内で過剰なチャージダイポールが生じ、電圧揺らぎの原因となる (dipole fluctuation)。さらに、このキャリアの励起・緩和は同時にトンネルジャンクションでの抵抗揺らぎを引き起こし、これもまた電圧揺らぎの原因となりうる (resistance fluctuation)。この2つの要因が同時に起こることが QCL の電気的なノイズの本質的な原因であると考えている。この機構から考えると、全く同じ量子井戸構造でもドーピングする位置や幅によって、特定の温度でのダイポールの大きさが変化するため、ノイズの温度特性が変化する。これを実験的に確かめ、ドーピングの位置や幅によりノイズが

抑制可能であることを実証した。

これらノイズの実験には、被測定物以外からのノイズを徹底的に抑える必要がある。そのため、駆動電源にはバッテリーを使用し、外からの電磁ノイズを遮蔽するために機器 (アンプやフィルタ、ケーブルなど) の取り扱いに細心の注意を払った。

さらに、QCL ノイズで得られた知見として、埋め込みに使われる InP (Fe ドープ) から大きなノイズが発生していることがわかった。これは QCL ノイズの測定において、導波路を埋め込んだもの (BH 型) と埋め込んでいないもの (Ridge 型) ではノイズのレベルに大きな違いがあることから判明し、InP (Fe ドープ) 単体のノイズ測定からもそれは確かめられた。

ノイズの測定は非常に難しく、その測定が正しく行われているのかを判断するのは簡単ではない。QCL の例では、最初に理論を考え、それを実験で確かめていくという手法をとった。こうすることで、実験の指針を明確にすることができる。

我々は、この例のように、ほかの半導体・光デバイスにおけるフリッカノイズもサイエンスとして理論的に取り組み、制御可能となり、デバイスの特性の向上に寄与できるのではないかと考えている。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、実験に関してご助言を賜りました平野琢也教授 (学習院大学理学部物理学科) に厚く御礼申し上げます。

¹¹ D.K.C. MacDonald: *Noise and Fluctuations: An Introduction* (Wiley, New York, 1962).

¹² M. Yamanishi, T. Edamura, K. Fujita, N. Akikusa, and H. Kan: *IEEE J. Quantum Electron.* **44**, 12 (2008).

¹³ S. Bartalini, S. Borri, I. Galli, G. Giusfredi, D. Mazzotti, T. Edamura, N. Akikusa, M. Yamanishi, and P. De Natale: *Opt. Express* **19**, 17996 (2011).

¹⁴ M. Yamanishi, T. Hirohata, S. Hayashi, K. Fujita, and K. Tanaka: *J. Appl. Phys.* **116**, 183106 (2014).

¹⁵ S. Hayashi, T. Hirohata, K. Tanaka, K. Fujita, and M. Yamanishi: *International Quantum Cascade Lasers School and Workshop (IQCLSW2016)*, (Cambridge, U.K., 2016).

GaN パワーデバイス成長技術における課題

山岡 優哉 (大陽日酸株式会社)

1. はじめに

大陽日酸(株)は、酸素(O)、窒素(N)、アルゴン(Ar)をはじめとする産業ガスメーカーであるが、化合物半導体向けMOCVD(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)装置の開発、および販売を行っている。当事業部ではMOCVD装置のハード開発だけでなく装置性能の検証・実証のために化合物半導体成長技術の開発にも取り組んできた。近年では、窒化ガリウム(GaN)を用いた電子デバイス向け成長技術の開発を進めている。しかし、開発過程において我々の評価技術では分析が困難な問題が明らかとなった。これらの問題を「産学協働の広場」の場をお借りし、紹介する。

2. 窒化ガリウムを用いたパワーデバイス

GaNは青色LED(Light-Emitting Diode)を実現した半導体として注目されている。GaNはシリコン(Si)に比べ絶縁破壊電界は約10倍、飽和電子速度は、ほぼガリウムヒ素と同等である¹。これらの物性から、GaNは高周波高出力パワーデバイスとして実用化が期待されている。

大陽日酸では、2種類のGaNパワーデバイス構造に関して開発を行っている。GaN on Si構造およびGaN on GaN構造である。図1に、GaN on Siパワーデバイス¹²およびGaN on GaNパワーデバイス¹³の概略構造および概略動作回路を示す。

GaN on Siパワーデバイスは電流がウェーハ表面に対して平行に流れる、横

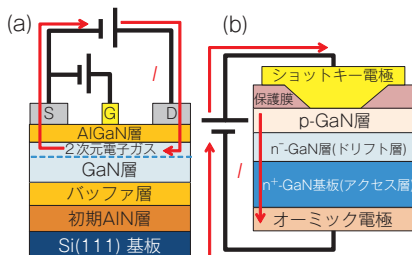


図1 GaNパワーデバイスの構造および動作回路。(a) GaN on Siパワーデバイス (AlGaIn/GaN 高電子移動度トランジスタ (HEMT)), (b) GaN on GaNパワーデバイス (pn 接合ダイオード)。

型デバイスである。一方、GaN on GaNパワーデバイスは電流がウェーハ表面から裏面へ向かって流れる、縦型デバイスである。それぞれのデバイスは電流を流す方向が異なるために、求められるGaNの結晶品質が異なる。そのため、それぞれのデバイス構造の成長に適したMOCVD装置の開発に取り組んでいる。

3. GaN on Siパワーデバイス向け成長技術開発における課題

GaN on Siパワーデバイスにおける課題の1つにデバイス表面側からSi(111)基板へ向かって流れる縦方向リーク電流が大きいことが挙げられる。これまでの開発の結果、初期AlN層の結晶品質を向上することによって、貫通転位密度を低減し、縦方向リーク電流の低減を実現した(図2)¹⁴。しかしながら、どの転位種がリークパスとなっているかは断定できていない。さらなる縦方向リーク電流低減のためには、リークパスを形成する転位種の特が必要であると考える。

4. GaN on GaNパワーデバイス向け成長技術開発における課題

GaN on GaNパワーデバイスは、

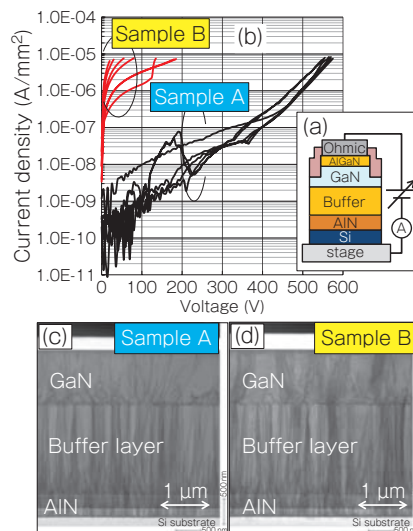


図2 (a) AlGaIn/GaN HEMT構造および縦方向リーク電流測定回路、(b)縦方向リーク特性、(c) Sample Aの断面TEM像、(d) Sample Bの断面TEM像。

n⁺-GaN基板上にMOCVD装置にてドリフト層であるn⁻-GaN層を成長し、デバイス構造を作製する。n⁻-GaN層のキャリア密度は10¹⁶ cm⁻³以下であることが求められている。GaN層中の炭素(C)を5.0×10¹⁵ cm⁻³まで低減し、Siを1.8×10¹⁶ cm⁻³添加した結果、GaN層のキャリア密度は1.6×10¹⁶ cm⁻³であった(図3)¹⁵。約2.0×10¹⁵ cm⁻³のSiがCによって補償されていると考えられる。さらなる低キャリア密度GaN層実現のためには、MOCVD装置にて成長するGaN層の高純度化および炭素やほかの不純物によるドナーの補償メカニズムの理解が必要であると考える。

5. まとめ

GaNパワーデバイス成長技術における課題を紹介した。GaN on Siパワーデバイスにおける課題は、リークパスを形成する転位種の特であると考える。GaN on GaNパワーデバイス成長技術における課題は、GaN層の高純度化およびCやほかの不純物によるドナーの補償の理解であると考える。

謝辞

GaN on Siパワーデバイスの開発は名古屋工業大学江川孝志教授との共同研究および、(国研)科学技術振興機構(JST)愛知地域スーパークラスタープログラムの支援により実施された。この場をお借りして深く感謝申し上げます。本稿執筆にあたり、ご指導いただきました皆さまに感謝申し上げます。

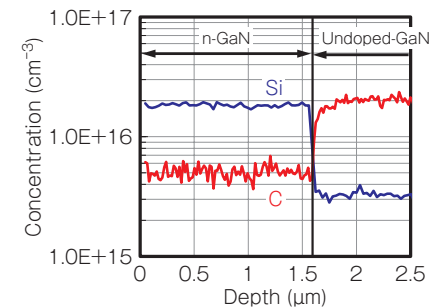


図3 GaN層中の不純物濃度。

¹¹ 高橋清監修: ワイドギャップ半導体光・電子デバイス, p. 24 (森北出版, 2006)。

¹² N. Ikeda, Y. Niiyama, H. Kambayashi, Y. Sato, T. Nomura, S. Kato, and S. Yoshida: Proc. IEEE **98**, 1151 (2010)。

¹³ Y. Hatakeyama, K. Nomoto, N. Kaneda, T. Kawano, T. Mishima, and T. Nakamura: IEEE Electr. Device L. **32**, 1674 (2011)。

¹⁴ 山岡ほか: 電子情報通信学会技術研究報告, **115**, 77 (2015)。

¹⁵ 朴冠錫, 矢野良樹, 池永正, 三嶋晃, 田淵俊也, 松本功: 第77回応用物理学会秋季学術講演会予稿集, 16a-P5-19 (2016)。