

橋詰研では、窒化物半導体とナノポーラス構造を利用した環境エレクトロニクスに関する研究を展開しています。<http://hydrogen.rciqe.hokudai.ac.jp/~taketomo/home/index.html>を参照下さい。

地球温暖化への対策は大きく分けて2つある。1つは、エネルギー源を非石油化し、CO₂排出量の少ないグリーンエネルギーとすることである。その代表格は太陽光発電であるが、エネルギー源の転換には長い時間を要するため、エネルギー消費量を劇的に抑制する事が緊急の課題になっている。図1に、世界の電力消費量と予測を示すが、このままの傾向で推移すると、2020年に現在の約2倍の消費量になる。

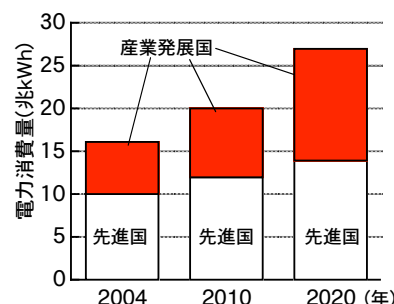


図1 世界の電力消費量の見通し

電力エネルギーは生成された1次エネルギーの42%をも占め(2005年実績)、さらに図2に示すように、1次エネルギーの相当部分は電気エネルギーに変換され電子・電気機器、動力、照明、熱として利用されている。このエネルギー変換には、「インバータ」と総称される電力変換システムが利用され、ほぼ全てのエネルギー流通・消費に関わっているため、インバータ変換損失を劇的に低減することは「省エネルギーの核」と言える。

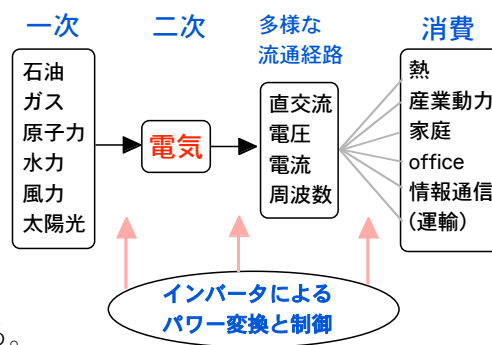


図2 エネルギー流通と電力変換

現行のインバータ用素子として、シリコン(Si)パワートランジスタが使用されているが、動作時の抵抗損失やスイッチング遅延損失のため、インバータの変換効率は90%程度であり、約10%もの電力損失を伴っている。Si素子ではその材料性能限界と自己発熱のため、これ以上の効率向上は不可能である。日本の年間発電量は約1兆kWhであるが、例えば、家電製品のインバータ効率が5%向上した場合、家庭用電力だけで100億kWhの省電力が予測されている(火力発電所2-3基分)。世界的にみると、インバータを組み込んだ製品の普及率は非常に低く、低損失のインバータが家電に利用されると、世界のエネルギー消費量を劇的に低減することが可能となる。さらに、太陽光等の直流発電の増加、ハイブリッド車の普及、情報通信の集中化、産業用電力の増加およびofficeにおける電力集中化に伴い、GaNインバータなどの次世代インバータ開発により、2020年で2000億kWh以上の省エネルギーが可能であると算出されている。

GaNの優位性—異種接合構型トランジスタ構造—

Siに替わるインバータ用半導体として、炭化シリコン(SiC)と窒化ガリウム(GaN)が挙げられる。その最大の理由は、Siと比較して約10倍の絶縁破壊電界を有するためである(表1)。デバイスの基本要素のpn接合や金属接合において、同じ電圧を接合に加えた場合に接合長(空乏層長)を1/10に縮小でき、キャリア密度を100倍に設計できるため、動作抵抗(導通抵抗)を1/100以下に低減できる。すなわち、電力変換を行う場合のジュール損失を著しく抑制することができる。また、SiCとGaNはSiの3倍以上の禁制帯

表1 Si, SiC, GaNの物性比較

	室温の禁制帯幅	破壊電界 (MV/cm)	キャリア密度 (cm ⁻²)
Si	1.1 eV	0.3	1 x 10 ¹² (MOS)
SiC	3.3 eV	3.0	1 x 10 ¹² (MOS)
GaN	3.4 eV	3.0	2 x 10 ¹³ (ヘテロ)

幅を持つため、高温環境でもキャリア密度変動が非常に小さく、安定動作するデバイスに本質的に適している。これらの優位点においてSiCとGaNに決定的な差はない。GaN系の特長は、**図3**に示すように、異種(ヘテロ)接合による2次元電子層形成ができる点であり、その高移動度・高電子密度を駆使し横型デバイスにおいても低い導通抵抗を実現する。この点は、SiCでは不可能である。この異種接合を利用することにより、横型トランジスタ構造においても動作抵抗の革新的低減とサイズ縮小を同時に達成することができ、縦型構造を基本とするSiデバイスと比較して、GaN系独自のインバータ設計、集積化、高速動作が可能となる。

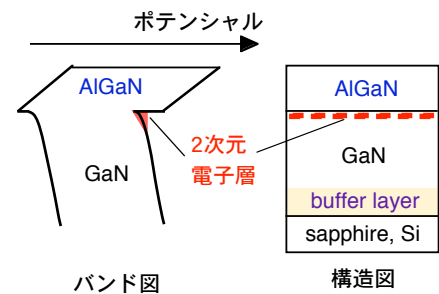
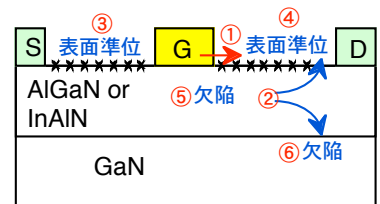


図3 AlGaIn/GaN異種構造とポテンシャル

GaNトランジスタの課題—信頼性とノーマリオフ動作—

これまでの半導体素子の常識を超える高電界・高電流密度で動作を余儀なくされるため、電流変動・低下に代表される安定性・信頼性の問題が生じている。この機構を解明し、真にロバストなトランジスタを実現することが、今後数年間の研究ステージで最重要課題と設定されている(2008年10月にスイスで開催された「窒化物半導体国際ワークショップ」における総括討論)。



- ①ゲート端から表面準位へのトンネル注入
- ②高ドレイン電界による暑い電子注入
- ③表面ピンニングによるソース抵抗増大
- ④表面準位による仮想ゲート効果
- ⑤⑥逆ピエゾ効果による欠陥生成

図4 GaN系横型トランジスタの劣化要因

図4に劣化の主要因と考えられている点を示す。特に、表面および結晶内に存在する電子準位(バルク準位)の影響、電界・温度ストレスによる増大と新たな準位の発生が、局所的な高密度電荷発生や電界集中を誘発し、デバイスの特性劣化・破壊に直結している可能性が高い(IEEE Dev. Mat. Rel., 2008)。しかしながら、AlGaIn、GaN、およびそのヘテロ界面での電子準位はほとんど特定されておらず、デバイス特性劣化との相関も明らかにされていない。

さらに、インバータに用いるトランジスタでは、故障時に負荷に過電流が流れないように、制御信号が無い場合(ゲート電圧が0V)、トランジスタがoff状態になっていなくてはならない。これをノーマリオフ動作と呼ぶが、GaNトランジスタはこの性能が実現されていない。図3のAlGaIn/GaNヘテロ構造には顕著な分極効果が現れ、ゲート電圧0Vでヘテロ界面に高密度の2次元電子層が発生する。これを精密に制御する構造を確立することが、GaNインバータ実用化へのポイントである。

そこで橋詰研究室では、GaN系材料の電子準位評価と種々の接合構造の制御を基板として、次世代インバータに応用可能な「異種接合GaN横型トランジスタ」の開発を行っている。