

ダイヤモンドと異種材料の 直接接合による高効率デバイスの 実現

梁 剣波 (りょう・けんぼ)
重川 直輝 (しげかわ・なおてる)

大阪市立大学 大学院工学研究科 電子情報系専攻

1. はじめに

近年、半導体素子の小型化、高集積化、高性能化に伴い、情報技術の急速な進歩を遂げている。素子の高性能化に伴って発熱が急激に増大し、素子の温度上昇を引き起こす。温度上昇による素子の寿命と出力の低減及び故障率の増加が深刻な問題となっている。一般的に半導体素子の動作部の温度が10℃上がる毎に素子の寿命は半減し、故障率は約2倍上昇することが知られている。窒化ガリウム (GaN) 等パワー半導体素子は Si 系素子より高温・高耐圧での動作が可能であるものの、動作時の発熱量が多く、素子温度は100℃以上にも上昇する。素子内部の動作温度が許容値を超えると熱歪みが発生し、機能劣化や故障の原因となり、著しい場合は素子が破壊される。素子の温度上昇を抑制するには発熱を速やかに外部に放熱することが必須である。発生する熱は主に素子基板を通じて放出される。Si や GaN 基板の熱伝導率 (Si : 1.5 W/cm K, GaN : 2.1 W/cm K) は銅の熱伝導率 (3.98 W/cm K) より数倍小さいことで、素子の放熱特性を大きく制限している。

ダイヤモンドは炭素の同素体で、sp³ 混成軌道の共有結合により強固に結合しているために鉱物中に最も硬く、これまで宝石や研磨材として利用されている。また、光学特性や化学的安定性等に優れた特性を持ち、炭化シリコン (SiC) や GaN などの半導体材料より更に優れた物性を有する新しい半導体材料である。更に、ダイヤモンドは物質中最高の熱伝導率を有することで、理想的な放熱基板として大い

に注文されている。ダイヤモンドは高温高压法、熱フィラメント CVD (Chemical Vapor Deposition : 化学気相成長) 法やマイクロ波 CVD 法により工業的に合成され、そのサイズは1 cm角程度が限界とされる。また、ダイヤモンドの格子定数や熱膨張係数が Si や GaN 等の半導体材料と大きく異なり、上記の手法によるダイヤモンド/異種材料の直接接合を形成することが極めて困難である。

我々は、超真空中にアルゴン等の中性不活化ガスの原子ビームを試料表面に照射し、表面の汚染物質や自然酸化膜等を除去することで表面を活性化させ、活性化された試料表面同士を一定の荷重をかけて接触させ、接合するという表面活性化接合技術に着目し、ダイヤモンドと異種材料の直接接合への表面活性化接合技術の導入の可能性を探索している。具体的に、ダイヤモンドと Si の高機能性を目指すダイヤモンドと Si 基板の直接接合、優れた放熱特性を有する GaAs 系高周波パワー素子動作を目標とするダイヤモンドと GaAs 層の直接接合、低熱抵抗パワーモジュール構造の作製を実現するためのダイヤモンドと金属 (Al と Cu) の直接接合、の研究開発を行っている。本稿では、我々が進めている上記の研究進捗を紹介すると共に今後の発展を展望する。

2. ダイヤモンド / Si 接合の作製と 接合界面構造の評価

我々は高温高压合成 (High Pressure High Temperature (HPHT)) により合成した4 mm角の単結晶ダイヤモンド基板の表面を研磨し、Si (100) 基

板との直接接合を行った^[1]。ダイヤモンド表面の凹凸指標である平均表面粗さ（Average Roughness (Ra)）は研磨前に4.1nmで、研磨後に0.5nmまで平坦化した。Si基板表面のRaは0.3nmであった。ダイヤモンド/Si接合試料表面の全体光学顕微鏡像と接合界面の断面走査型電子顕微鏡（Scanning Electron Microscopy (SEM)）像をそれぞれ図1(a)と1(b)に示す。接合試料に接合ができていない領域や気泡等が観察されていないことにより全面積の接合を実現した。また、接合界面の断面SEM像に機械的な破損、亀裂、空洞が観察されていないことで、強い接合界面の形成に成功した。

接合界面の断面透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscopy (TEM)）像と接合界面付近の電子エネルギー損失分光（Electron Energy-Loss Spectroscopy (EELS)）スペクトルをそれぞれ図2(a)と2(b)に示す。EELSスペクトルの測定が接合界面のTEM像に記したPoint1と2の2か所と界面からダイヤモンド側に数百nmに離れた位置の1か所を行った。接合界面から離れた位置においては、EELSスペクトルは主にCの σ 軌道の寄与のみが観測された。一方、界面付近のEELSスペクトルは σ 軌道と π 軌道両方の寄与を観測した。1000°Cで熱処理したダイヤモンド/Si接合界面の断面低倍率と高倍率TEM像を図3に示す^[2, 3]。低倍率の断面

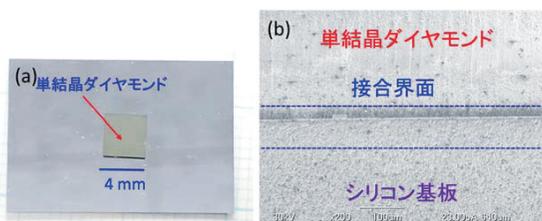


図1 ダイヤモンド/Si接合試料表面の全体光学顕微鏡像(a)と接合界面の断面SEM像(b)

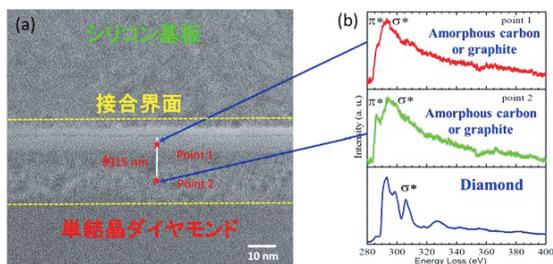


図2 ダイヤモンド/Si接合界面の断面TEM像(a)と界面付近の電子エネルギー損失分光(EELS)スペクトル(b)

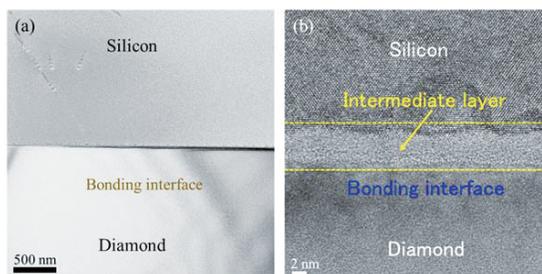


図3 1000°Cで熱処理後ダイヤモンド/Si接合界面の断面低倍率TEM像(a)と断面高倍率TEM像(b)

TEM像に一直線が観察され、これは接合界面に対応する。接合界面付近に材料の熱膨張係数差による機械的な破損や接合の剥離などが観察されなかったことで、1000°Cでの耐熱性を有することが明らかになった。高倍率の断面TEM像に厚さ約5nmの中間層が観察され、化学結合状態分析を行った結果、SiC層であることが明らかになった。以上により、表面活性化接合技術によって常温でダイヤモンド表面を一部アモルファス化かグラファイトカーボン化にすることで、Siとの直接接合が実現したと考えられる。更に我々は接合試料の熱処理を行い、ダイヤモンドとSiの間に大きい熱膨張係数差があるにもかかわらず（ダイヤモンドの熱膨張係数： $0.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 、Siの熱膨張係数 $2.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ）、1000°Cでの熱処理条件に耐えることを見出した。

3. ダイヤモンド/GaAs接合の作製と接合界面構造の評価

常温でGaAs基板上に堆積したGaAs薄層を高温高圧法に合成したダイヤモンド基板と表面活性化法により接合した^[4]。接合後、ウェットエッチングによりGaAs基板を薄層化し、集束イオンビーム(FIB)加工によりTEM観察用の試料を作製し、ダイヤモンド/GaAs接合界面構造を評価した。接合したダイヤモンド/GaAs接合界面の断面TEM像を図4に示す。接合界面に空隙は観察されず、良好な接合界面が得られた。接合界面に薄い結晶欠陥層が形成され、これは接合プロセス時にアルゴンビーム照射により発生したダメージだと考えられる。断面TEM像から中間層フリーダイヤモンド/GaAs接合が形成されていることが確認された。

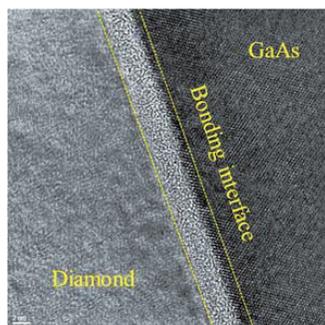


図4 ダイヤモンド／GaAs 接合界面の断面 TEM 像

4. ダイヤモンド／金属 Al と Cu 直接接合の作製と接合界面構造の評価

ダイヤモンドと市販 Al, Cu 板を常温で表面活性化技術により接合した^[5-7]。集束イオンビーム (FIB) 加工により TEM 試料を作製し、ダイヤモンド／Al とダイヤモンド／Cu 接合界面構造を評価した。接合形成後に窒素雰囲気中で熱処理を行い、熱処理温度による接合界面構造への影響を TEM 観察により評価した。ダイヤモンド／Al とダイヤモンド／Cu 接合界面の断面 TEM 像をそれぞれ図5と6に示す。接合界面にナノレベルの空隙や破損が確認されず、強力な接合ができたことを示す。また、上記のダイヤモンド／Si とダイヤモンド／GaAs 接合同様に

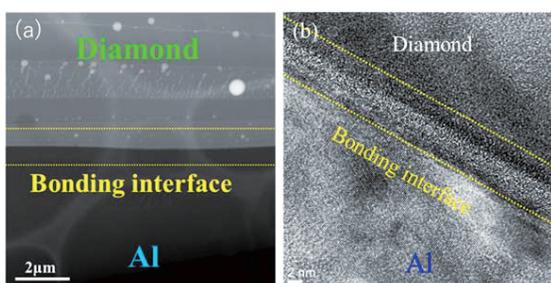


図5 ダイヤモンド／Al 接合界面の断面低倍率 TEM 像(a)と断面高倍率 TEM 像(b)

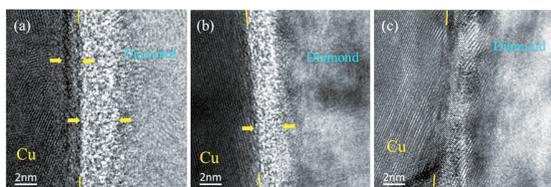


図6 熱処理前(a), 500°C(b)と700°C(c)での熱処理後のダイヤモンド／Cu 接合界面の断面 TEM 像

ダイヤモンド／Al とダイヤモンド／Cu 接合界面に薄い結晶欠陥層が観察された。Al と Cu 表面の Ra は 1 nm を大きく上回っているものの、良好な接合が形成されている。これは Al と Cu が Si や GaAs などの半導体材料と比べ、圧力により表面変形が起こりやすく、表面凹凸の影響を抑制したと考えられる。ダイヤモンド／Al 接合についても耐熱性評価も行い、Al の融点に近い 600°C での耐熱性を確認した。熱処理前後のダイヤモンド／Cu 接合界面の断面 TEM 像を図6に示す。熱処理前の接合界面に形成された結晶欠陥層が熱処理温度の上昇と共に薄層化し、700°C 熱処理した界面に観察されなかった。これは熱処理プロセスによる結晶欠陥層の回復だと考えられる。これらの結果からダイヤモンド／金属 Al と Cu 接合界面が高い耐熱性を有することが明らかになった。

5. ダイヤモンド／異種材料の直接接合による高効率デバイスへの応用展望

ダイヤモンドと Si を直接接合し、かつ接合界面が 1000°C ほどの耐熱性を有することが明らかになった。これにより、Si 基板と接合されたダイヤモンド単結晶上に成膜し、ダイヤモンド素子の形成が可能となる。また、高出力・高周波動作するダイヤモンド系素子と制御用の Si 集積回路を同一の Si 基板上に形成する小型・高密度集積モジュールの実現が期待される。更に、「ダイヤモンドと Si, GaAs 半導体の直接接合」「ダイヤモンドと金属 Al, Cu の直接接合」の研究成果を組み合わせることにより、図7に示すような、ダイヤモンドを放熱基板とするパワー半導体モジュールの実現が可能と思われる。現時点では、ダイヤモンドの薄片と Si, GaAs 基板の接合に成功した段階である (ダイヤモンドの面積 < Si, GaAs

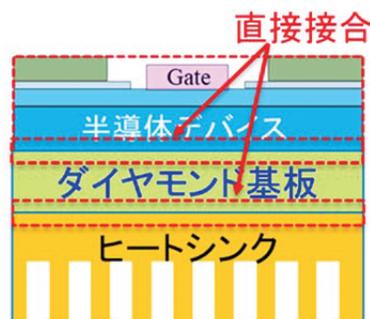


図7 ダイヤモンドと異種材料の直接接合により実現可能な低熱抵抗モジュール構造

基板の面積)。今後、ダイヤモンドを放熱基板とするモジュール構造の実現に向けて、Si や GaAs 等の半導体素子と接合半導体と同じ面積のダイヤモンドとの直接接合の検討、接合用の大面積ダイヤモンド基板の開発を行う必要がある。このように異種材料接合技術、ダイヤモンドの材料技術、素子技術が融合することにより、エレクトロニクスに新たな展開が生まれることが期待される。

謝 辞

研究の実施に当たり、科研費・平成 28 年度挑戦的萌芽研究「パワー素子に向けたダイヤモンド/シリコン常温接合とその結晶工学的機構の解明 (16K13676)」, 平成 30 年度挑戦的研究 (萌芽)「高効率素子に向けたワイドギャップ半導体/ダイヤモンド直接接合及び界面相構造の解明 (18K19034)」, 公益財団法人ヒロセ国際奨学財団第 4 回研究助成の支援を受けた。本研究の一部は、東北大学金属研究所における共同研究 (18K0037 と 19K0037) により実施されたものである。単結晶ダイヤモンドと Si の直接接合は佐賀大学・嘉数誠教授との共同研究である。多結晶ダイヤモンドと Al の直接接合はイギリス・ブリストル大学 Martin Kuball 教授との共同研究である。SEM 観察を行うにあたり、大阪市立大学・工学研究科の兼子 佳久教授のご助力をいただいた。

引用文献

[1] Jianbo Liang, Satoshi Masuya, Makoto Kasu, and Naoteru Shigekawa, Applied Physics Letters, vol. 110,

pp. 111603 (2017).

- [2] Jianbo Liang, Yan Zhou, Satoshi Masuya, Filip Guemann, Manikant Singh, James Pomeroy, Seongwoo Kim, Martin Kuball, Makoto Kasu, Naoteru Shigekawa, Diamond & Related Materials 93, 187-192 (2019).
- [3] Jianbo Liang, Satoshi Masuya, Seongwoo Kim, Toshiyuki Oishi, Makoto Kasu, and Naoteru Shigekawa, Applied Physics Express 12, 016501 (2019).
- [4] 中村 祐志, 清水 康雄, 大野 裕, 詹 天卓, 山下 雄一郎, 白崎 謙次, 永井 康介, 渡邊孝信, 嘉数 誠, 重川直輝, 梁 劍波, “GaAs/Diamond 直接接合の界面評価” 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学札幌キャンパス, 2019 年 9 月 21 日, 21p-E301-6
- [5] Jianbo Liang, Shoji Yamajo, Martin Kuball, and Naoteru Shigekawa, Scripta Materialia, vol. 159, pp. 58 – 61 (2019).
- [6] Shinji Kanda, Yasuo Shimizu, Yutaka Ohno, Kenji Shirasaki, Yasuyoshi Nagai, Makoto Kasu, Naoteru Shigekawa, and Jianbo Liang, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 59, SBBB03 (2020).
- [7] Jianbo Liang, Yutaka Ohno, Yuichiro Yamashita, Yasuo Shimizu, Shinji Kanda, Naoto Kamiuchi, Seongwoo Kim, Koyama Koji, Yasuyoshi Nagai, Makoto Kasu, and Naoteru Shigekawa, ACS Applied Nano Materials, vol.3, 2455 (2020).