

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760300

研究課題名（和文）

ダイヤモンド半導体評価のための高感度非輻射欠陥評価系の開発

研究課題名（英文）

Development of high sensitivity non-radiation defect characterization systems for diamond semiconductor

研究代表者

毎田 修 (MAIDA OSAMU)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40346177

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的はダイヤモンド結晶を中心としたワイドギャップ半導体材料の非輻射欠陥評価系を開発することである。焦電素子による信号検出系を用いることで高感度化した試料温度可変（80～400K）光音響分光評価系を開発し、高温高压合成ダイヤモンド結晶およびマイクロ波プラズマ CVD 法により形成したホモエピタキシャルダイヤモンド自立膜の特性評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this work is to develop a non-radiative defect characterization system for wide-gap semiconductor materials, especially diamond crystal. I have developed a temperature-variable (80~400K) photothermal spectroscopy using a high-sensitive signal detector with a piezoelectric device, and carried out the defect characterization of a high-pressure/ high-temperature synthesized diamond crystal and a self-standing homoepitaxial diamond film grown by a micro-wave plasma chemical vapor deposition method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：半導体工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：ダイヤモンド・ワイドギャップ・非輻射欠陥

1. 研究開始当初の背景

炭化シリコン、窒化ガリウム、ダイヤモンド等のワイドギャップ半導体は優れた物性から次世代パワーデバイス・高周波デバイス

用半導体材料として期待されているが、そのデバイス化を妨げている最大の要因はワイドギャップ半導体結晶の不完全性にある。ワイドギャップ半導体結晶の高品質化のため

には結晶欠陥低減が必要不可欠であるが、しかし、その結晶欠陥評価においてはナローギャップ半導体に比べ大きな困難を伴い、バンドギャップ間の広範なエネルギー領域における有効な評価法が存在しない。ナローギャップ半導体においては外部印加電圧による半導体のバンドベンディングによりサブバンドギャップ欠陥準位の電荷占有の始状態をコントロールし、その後の印加電圧変化に伴う容量変化等の電気的特性変化を観測することでバンドギャップ間欠陥準位の絶対量を得る DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) 法等が存在し、これらの方法を用いることで広範なエネルギー領域における欠陥準位評価が可能である。しかしワイドギャップ半導体では、このようなバンドベンディングを用いる評価法で評価可能なエネルギー範囲はバンドギャップエネルギーの狭い範囲に限られる。そこで、これまでダイヤモンド半導体の結晶欠陥評価にはフォトルミネッセンス、カソードルミネッセンス法が積極的に用いられてきた。これらの評価法は光、電子線により励起されたキャリアが欠陥準位に捕獲される際の発光を観測することでバンドギャップエネルギー全域にわたり評価が可能であることからワイドギャップ半導体の欠陥準位評価法とし有効ではあるものの、輻射型欠陥の評価に限られる。ワイドギャップ半導体結晶では輻射型欠陥に加え非輻射型欠陥がより多く含まれると予想されることから、ワイドギャップ半導体結晶の更なる高品質化のためには非輻射型欠陥の評価が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究の目的はダイヤモンド半導体を中心としたワイドギャップ半導体の非輻射結晶欠陥評価系を開発することである。光音響分光評価系、一定光電流分光評価系等の光学的欠陥評価系を構築することにより、バンドギャップの広範なエネルギー領域にわたる非輻射欠陥評価を行い、またその評価結果を結晶作製にフィードバックすることでダイヤモンドを中心としたワイドギャップ半導体の結晶品質向上に寄与することである。

3. 研究の方法

本研究ではダイヤモンド半導体を中心としたワイドギャップ半導体の非輻射結晶欠陥評価系として光音響分光評価系、一定光電流分光評価系および光容量分光評価系の開発および検討を行った。また、開発した分光評価系を用いて高温高压合成ダイヤモンド結晶およびマイクロ波プラズマ CVD 法により形成したダイヤモンド自立膜の特性評価を行った。

4. 研究成果

(1) 光音響分光評価系の構築

研究開始当初は波長可変ピコ秒レーザーを励起光源とすることを検討したが、レーザー照射試料表面の評価からパルスレーザー照射時に試料表面においてアブレーション現象が起きていることを確認した。そこで本研究では分光評価光学系としてキセノンランプおよび分光器を用いた反射光学系を構築することで広範なエネルギー領域における評価を可能とした。

光音響分光評価系として圧電素子を用いた信号検出系を検討した。圧電素子を用いることで発生フォノンをマイクロフォンによる音波として検出する従来の光音響信号検出系に比べ高感度化が可能であることを明らかにした。また、その過程において評価試料および圧電素子の試料ホルダーとの熱コンダクタンスの低減により検出信号が増大することを見出した。このことは本研究で構築した光音響信号検出系においては発生フォノンによる圧電効果に加え、焦電効果による光音響信号を検出していることを示している。さらに検出する光音響信号は 10^{-6}V 以下と微小であるため新たにプリアンプ (チャージアンプ) を作製し、試料近傍に導入することで信号検出系の高感度化を果たした。

光音響分光評価ではキャリアの熱励起を低減することで評価エネルギー範囲を広げることが可能であり、測定試料および圧電素子の低温・真空環境下への導入を検討した。ここで前述の演算増幅器を用いたチャージ

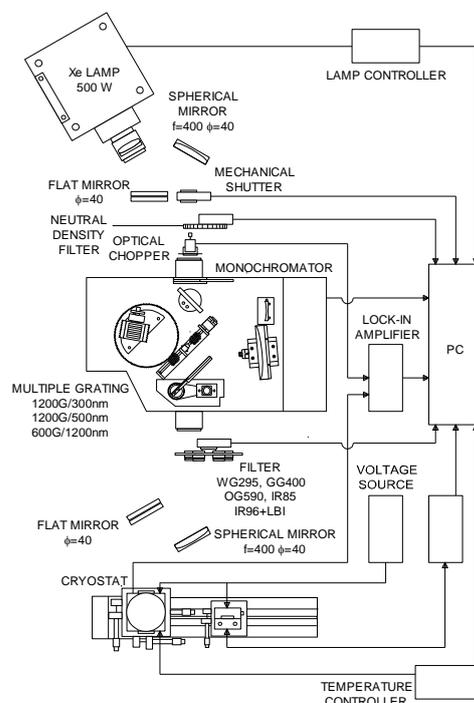


図 1 光音響分光評価系の概略図

アンプは低温環境下では使用できないため、液体窒素温度で動作可能な信号増幅系を検討した結果、接合型電界効果トランジスタを用いたプリアンプを作製し、その有効性を示した。本研究で構築した光音響分光評価系の概略図を図1に示す。

(2) 一定光電流分光評価系の構築

光音響分光評価系はポンプ光で結晶欠陥に捕獲されたキャリアを励起し、そのキャリアが非輻射欠陥に再捕獲される際に発生するフォノンを検出する評価法であるが、励起キャリアを光電流として検出することで一定光電流分光評価系への改良を図った。その結果、結晶欠陥検出感度としては光音響分光法に比べ若干劣るものの、輻射欠陥の評価も可能であり光音響分光法と相補的な評価法であることを示した。

(3) 光容量分光評価系の構築

前述の光音響分光評価系および一定光電流分光評価系はバルク結晶の評価が可能であるが、ワイドギャップ半導体では結晶基板上にエピタキシャル成長した結晶の欠陥評価が重要となる。そこでショットキー接合を形成した試料の結晶欠陥に捕獲されたキャリアを光励起し、その際のショットキー容量変化を検出する光容量分光評価系の構築を行った。しかし、ダイヤモンド結晶では不純物準位が深いいため、容量測定において低測定周波数を用いる必要があるが、市販のキャパシタンスメータで過渡応答を評価可能なものは存在しない。そこで参照容量を用いた容量差動検出系の構築を行うことで高感度化を図り、ボロンドープホモエピタキシャルダイヤモンド薄膜の評価を行い、その有効性を明らかにした。

(4) 光音響分光評価系によるダイヤモンド結晶の非輻射欠陥評価

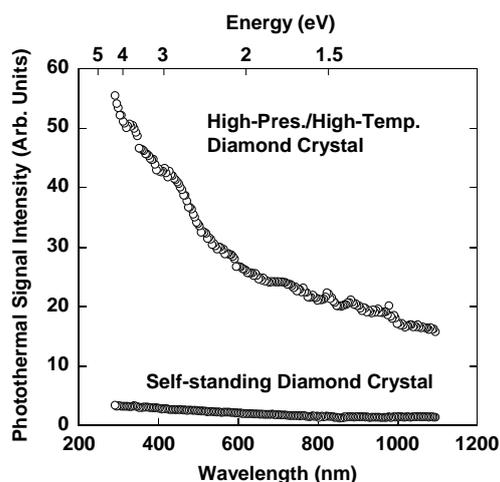


図2 高温高压合成ダイヤモンド結晶およびホモエピタキシャル成長ダイヤモンド自立膜の光音響信号スペクトル

本研究で構築した光音響分光評価系による高温高压合成ダイヤモンド結晶およびホモエピタキシャル成長ダイヤモンド自立膜の非輻射欠陥評価を行った。ダイヤモンド自立膜はオフ角 ($\theta_{\text{off}} = 5^\circ$) を有する高温高压合成 (100) 基板上にマイクロ波プラズマ CVD 法により膜厚 $150\mu\text{m}$ のホモエピタキシャルダイヤモンド膜を形成し、レーザー加工により高温高压合成基板を除去することで形成した。図2に得られた光音響信号の波長依存性を示す。高温高压合成ダイヤモンド結晶では連続的に非輻射欠陥が形成されていることを示している。また、窒素含有量が多い試料において窒素に起因するピークが確認された。一方、ホモエピタキシャル成長ダイヤモンド結晶に比べ光音響信号強度が $1/10$ 以下となり、このことは作製したダイヤモンド自立膜の結晶品質が良好であることを示している。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① M. Aono, O. Maida and T. Ito: "Hall data analysis of heavily boron-doped CVD diamond films using a model considering an impurity band well separated from valence bands" *Diamond and Related Materials*, 査読有, Vol. 20 (2011) 1357-1362.
DOI:10.1016/j.radmeas.2012.02.011
- ② O. Maida, H. Sato, M. Kanasugi, S. Iguchi and T. Ito: "Reduced influences of the HPHT substrates on the electronic quality of homoepitaxial CVD diamond layers and on their ultraviolet detector performance" *Diamond and Related Materials*, 査読有, Vol. 20 (2011) 242-245.
DOI:10.1016/j.diamond.2010.12.016

[学会発表] (計 32 件)

- ① 森 玲央奈, 毎田 修, 伊藤 利道: "ホウ素ドープ単結晶 CVD ダイヤモンドの高濃度ドープ領域における特性評価 II" 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 17 日, 早稲田大学 (東京都)
- ② H. Nishio, O. Maida and T. Ito: "Growth of phosphorus-doped homoepitaxial CVD diamond on vicinal (001) substrates" 15th International Conference on Thin Films, 8 Nov. 2011, Kyoto (Japan)
- ③ O. Maida, M. Aono and T. Ito: "Improvement on P-type performance of CVD diamond by isolating thin

heavily-boron-doped layer as innumerable islands" 15th International Conference on Thin Films, 8 Nov. 2011, Kyoto (Japan)

- ④ 多田 周平, 毎田 修, 伊藤 利道: "(001) 微斜面基板上的高濃度燐ドーブダイヤモンドのMWPCVD成長における基板温度の適正化" 第72回応用物理学会学術講演会, 2011年8月30日, 山形大学 (山形県)
- ⑤ 森 玲央奈, 伊藤 利道, 毎田 修: "ホウ素ドーブ単結晶 CVD ダイヤモンドの高濃度ドーブ領域における特性評価" 第72回応用物理学会学術講演会, 2011年8月30日, 山形大学 (山形県)
- ⑥ 西尾 晴樹, 毎田 修, 伊藤 利道: "(001) 微斜面基板上的燐ドーブ CVD ダイヤモンド薄膜におけるホモエピタキシャル成長プロセスの適正化" 第72回応用物理学会学術講演会, 2011年8月30日, 山形大学 (山形県)
- ⑦ O. Maida, S. Iguchi, T. Igarashi, H. Sato and T. Ito: "Fabrication of self-standing device - quality single-crystalline diamond films on vicinal (001) surfaces and its application to the high-energy photon detectors" 21st European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, and Nitrides, 9 Sep. 2010, Budapest (Hungary)
- ⑧ M. Aono, O. Maida and T. Ito: "Hall data analysis of heavily-boron-doped CVD diamond films based on a two-type carrier model and their application to improvement on p-type performance of CVD diamond" 21st European Conference on Diamond, Diamond-Like Materials, Carbon Nanotubes, and Nitrides, 9 Sep. 2010, Budapest (Hungary)

[その他]

ホームページ等

<http://daiyan.eei.eng.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

毎田 修 (MAIDA OSAMU)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 40346177