

## ● ワイドギャップ半導体デバイスの開発 — CVD ダイヤモンドの高品質化と検出器への応用 —

多くの優れた物性を有するワイドギャップ半導体のダイヤモンドについて、本年度は、マイクロ波プラズマCVD法を用いて、(001)微斜面基板上のホモエピCVD成長を行うことにより、ダイヤモンド膜自体の結晶品質を向上させた。特に、高品質CVD自立膜の作製プロセス条件のうち、最も重要な条件である成長温度の適正化を行った。更に、オフ角5度の(001)微斜面基板におけるホウ素ドーパ層の作製プロセス、特に合成温度を適正化し、これまで問題となっていた高ドーパ濃度化に伴う機能性の低下を大幅に抑制できる新たなキャリア制御方法を見出した。一方、デバイス関連では、ホウ素ドーパ層を適正に挿入することにより、低品質高圧合成基板へのキャリア拡散が効果的に抑制できることを実証するとともに、CVDダイヤモンド自立膜を用いて光子検出器を試作し、ホウ素ドーパ層の挿入により低電圧検出特性が格段に改善されることを明らかにした。

### 1. はじめに

広いバンドギャップ(5.5eV)を有するダイヤモンドは、物質中で最大の絶縁破壊電界、常温近傍での最大の熱伝導率、化学的に安定で最大の電気化学電位窓など、多くの優れた物性を有するため、パワーエレクトロニクス分野をはじめとして、複数の分野で応用可能な材料と考えられている。しかしこれまで、結晶品質の良い大面積試料が容易に得られないこと、p-n制御のための有効なアクセプター(ホウ素)やドナー(燐)の準位が深く、特に、n型試料の場合は作製も容易でないことなど、パワーエレクトロニクス分野への応用を実現するには多くの開発課題がある。他方、結合力が非常に強いダイヤモンドは、最大の放射線耐性を有している半導体材料でもあるため、放射線検出器としての応用や、高温・高放射線照射環境下でも機能する電子デバイスの実現が期待されている。我々はこれらの期待に応えるため、マイクロ波プラズマ気相合成(MWPCVD)法を用いたダイヤモンドの高品質化及び成膜速度の高速化を両立できる作製プロセスの開発を行うとともに<sup>[1-4]</sup>、ダイヤモンドデバイスとして最も早期に実用化が期待される放射線検出器の高性能化について基礎的研究を行っている<sup>[5-9]</sup>。

### 2. CVDダイヤモンドの高品質化

#### 2.1. CVDプロセス改善による高品質化

標記の研究テーマに関して、得られた研究成果の

主なものは以下の通りである。ダイヤモンド(001)面から微小角傾いた微斜面基板の有効性を更に進展させるため<sup>[2,4]</sup>、オフ角5度の試料について、その作製プロセス条件に検討を加え、アンドープ及びホウ素ドーパ(p型)試料における成長温度を適正化した。また、厚い高品質CVD膜を形成した後、使用した低品質高圧合成(HPHT)Ib基板から分離して得られるCVDダイヤモンド自立膜形成プロセスについても微斜面基板の有効性を明らかにした<sup>[10]</sup>。一方、合成が最も困難なn型試料について<sup>[3]</sup>、燐ドーパCVDダイヤモンドの合成プロセスを検討した結果、結晶品質の良さを測る指標である励起子発光が観測できる試料は、オフ角5度の(001)微斜面HPHT Ib基板上では合成されにくく、むしろオフ角のないHPHT Ib(001)基板の方が適していることが判明した。これは、成長中に出現する成長丘の生成と深く関係していた。

#### 2.2. 構造制御による高品質化

ドーパホウ素濃度の増大とともに生じる正孔移動度の低下を抑制するため、現状では高品質化が唯一期待できるホモエピ成長プロセスを用いた上でキャリア供給領域とキャリア走行領域を分割する方法の有効性を検討した結果、以下に示す作製プロセスの有効性が明らかになった。まず、アンドープバッファ層をHPHT Ib(001)基板上に成長した後、薄い高濃度ホウ素ドーパ試料を形成した。この高濃度ドーパ層は常温以下ではキャリア(正孔)は縮退してお

り、金属的な様相を示した。次に、この層の上にPt薄膜の自己凝集現象を利用したマスクを形成し、酸素プラズマエッチングにより、この高濃度ドーブ層を数百nm以下のサイズの無数の領域に分割し孤立させた。その後、アンドープ層をホモエピさせた。このような試料のホール測定を行い、従来の報告値と比較したところ、図1に示すように、同一キャリア(正孔)密度における高濃度化に基づく移動度の低下がかなり抑制されることが実証できた。また、アクセプター不純物のホウ素の実効的な活性化エネルギーを低減できることも判明した。

一方、燐ドーブn型(001)試料の場合、オフ角5度の微斜面(001)基板上的ホモエピ成長については、デルタドーブ的な積層構造にすると有効になることが示された。

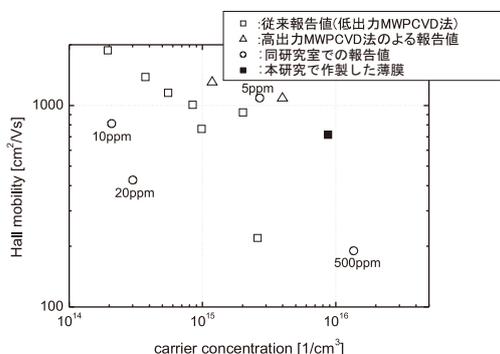


図1. 室温におけるシートキャリア濃度とホール移動度の関係

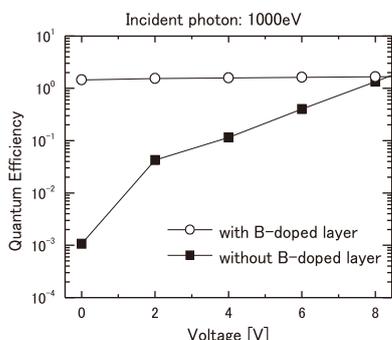


図2. 高品質ホモエピCVDダイヤモンドを用いて試作した検出器の軟X線検出における量子効率の印加電圧依存性。ホウ素ドーブ層を挿入した場合(○印)としない場合(■印)との相違。入射軟X線のエネルギーは1 keV。

### 3. CVDダイヤモンド検出器の高性能化

ダイヤモンド電子デバイスとして最も早期に実用化が期待されるのは、最も高品質なCVDダイヤモンドを形成できるアンドープホモエピ膜がデバイスの主構造として活用できる検出器である。しかし、CVDエピ膜の品質向上とともに、低品質HPHT Ib基板への励起キャリアの拡散がデバイス特性に悪影響を与えることが顕在化してきた。この問題を解決するには、十分厚い高品質ホモエピ膜を成長させるか、

あるいは、低品質基板へのキャリアの拡散を阻止するポテンシャル障壁層を設ける等の方法が考えられる。前者の場合、影響が無視できる程度のホモエピ層の厚さは、通常250 $\mu$ m以上であり、その程度の厚さがあれば、十分CVD自立膜が形成でき、そうすることにより完全にHPHT基板の影響を除去できる<sup>[10]</sup>。一方、拡散障壁層を挿入する場合、その層の上側に高品質CVDダイヤモンド層を形成する必要があるため、ホモエピ層しか十分高品質なダイヤモンド層が形成される状況ではないことを考慮すると、不純物をドーブ層したホモエピ層の積層構造以外には現状では方法がない。そこで、p型層をバッファ層の上に堆積させた後、アンドープ層をホモエピした積層構造にしたところ、図2. に示すように、特に低電圧印加領域において高効率で動作する検出器として有効であることが実証できた<sup>[8]</sup>。同図のデータは、エネルギーが1 keVの軟X線を検出した場合であるが、勿論、紫外線検出器としても低印加電圧領域の高効率動作も同様に達成されている。

また、燐ドーブn型試料のオーミック電極形成プロセスにおけるイオン打込み・アニールプロセスの効用について、ドーブした燐の局所的高濃度化が生じることによりオーミック化が促進されることを見出した。

### 参考文献

- [1] T. Teraji, T. Ito: J. Cryst. Growth 271 (2004) 409.
- [2] O. Maida, H. Miyatake, T. Teraji, T. Ito: Diamond Relat. Mater. 17 (2008) 435.
- [3] T. Nakai, O. Maida, T. Ito: Appl. Surf. Sci. 254 (2008) 6281.
- [4] K. Arima, H. Miyatake, T. Teraji, T. Ito: J. Cryst. Growth 309 (2007) 145.
- [5] H. Matsubara, Y. Saitoh, O. Maida, T. Teraji, K. Kobayashi, T. Ito: Diamond Relat. Mater. 16 (2007) 1044.
- [6] Y. Iwakaji, M. Kanasugi, O. Maida, T. Ito: Appl. Surf. Sci. 254 (2008) 6277.
- [7] Y. Iwakaji, M. Kanasugi, O. Maida, T. Ito: Appl. Phys. Lett. 94 (2009) 223511.
- [8] M. Kanasugi, Y. Iwakaji, T. Yamamoto, O. Maida, Y. Takeda, Y. Saitoh, T. Ito: Nucl. Instrum. Meth. A (2010) in press.
- [9] M. Hamada, T. Teraji, T. Ito: J. Appl. Phys. 107 (2010) 063708.
- [10] S. Iguchi, O. Maida, T. Ito: Thin Solid Films (2010), in press.