



Title	ワイドギャップ半導体における伝導度制御
Author(s)	末宗, 幾夫; 広瀬, 淳; 大澤, 英明
Citation	電子科学研究, 5, 68-70
Issue Date	1998-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/24414
Type	departmental bulletin paper
File Information	5_P68-70.pdf



ワイドギャップ半導体における伝導度制御

光材料研究分野 末宗 幾夫, 広瀬 淳, 大澤英明

昨今活発に進められている短波長光デバイスの研究は、ワイドギャップ半導体における伝導度制御のブレークスルーが大きな推進力となり、また現在もその進展を律速する大きな要因となっている。ここではこの伝導度制御に関する簡単なレビューと我々の取り組みについて紹介する。

1 まえがき

ワイドギャップ半導体は長い間基礎研究が続けられてきたが、II-VI族半導体は波長 520 nm の青緑色半導体レーザとして寿命 100 時間^[1]、窒化物半導体は波長 420 nm の青色半導体レーザとして寿命 3000 時間^[2]を記録するに到った。このような短波長レーザの実現は、それぞれの半導体における伝導度制御にブレークスルーがあって初めて可能になった^{[3],[4]}。しかし短波長レーザの実現した現在でもなお伝導度制御が重要であり、レーザ特性向上の鍵を握っている。II-VI族半導体ではエネルギーギャップの増大に伴う急激な実効アクセプター濃度の低下^[5]がレーザ発振波長の短波長化を困難にしているとともに、電極のオーミック接触はまだ課題が残されている。一方窒化物半導体でもオーミック接触が多くの研究者にとって大きな課題であり、レーザの連続動作を実現する障壁となっている。

以下では、ワイドギャップ半導体においてこのように伝導度制御が大きな課題となる物理的要因について述べる。また我々の進めている伝導度制御の取り組みについて解説する。

2 ワイドギャップ半導体ではなぜ伝導度制御が難しいか？

VLSIに用いられるシリコンはエネルギーギャップ 1.12 eV で発光波長は赤外領域であり、かつ間接遷移半導体であるため発光量子効率も低い。シリコンよりイオン性の大きいII-VI、窒化物などの化

合物半導体ではエネルギーギャップが大きく、可視短波長領域での発光が可能となる。しかしこうした化合物半導体では、構成する陽原子と陰原子の比率がずれると、空格子点、配列がずれると、格子間位置原子、アンチサイト欠陥などの点欠陥が発生し、伝導度制御が困難になる^[6]。

以上は母体結晶の問題であるが、エネルギーギャップの増大に伴い不純物原子自体に関する問題も生じてくる。例えば、伝導度制御のために不純物を添加する際の不純物原子の固溶限界^[7]、不純物エネルギー準位の活性化エネルギーの増大による自由キャリア活性化率の低下、水素原子による不純物原子の不活性化(中性)化^[8]、不純物原子の格子位置の緩和による活性化エネルギーの増大^[9]などがその例として挙げられる。

以上の例は用いる不純物原子と母体結晶の関係によっても変わるが、より一般的な伝導度制御の限界を考える上で、両極性真性欠陥モデル^{[10],[11]}は有益な示唆を与えてくれる。図1はIV族、III-V族、II-VI族半導体の相対的なエネルギー関係を示したものである^[11]。各半導体のエネルギー基準はフェルミレベル安定化エネルギー (E_{FS})として知られ、フェルミエネルギーがこのエネルギー位置 E_{FS} にあるときに結晶構造が最も安定化すると考えられる。これらの結晶に不純物を添加すると、フェルミエネルギーが E_{FS} からずれてくるが、このずれが大きくなるとフェルミレベルの移動を抑えるように真性欠陥が自動的に生じて伝導度を自己補償すると考えるのが両極性真性欠陥モデルである。実際、多くの半導体におけるp型、n型不純物添加限界はこのフェルミエネルギーのシフトと

強い相関を示し^[11], E_{FS} から遠いバンド側で伝導度制御が困難になる傾向を示す。ワイドギャップ半導体では特にバンド端が E_{FS} から遠くなりやすく, 伝導度制御が大きな課題となってくる。

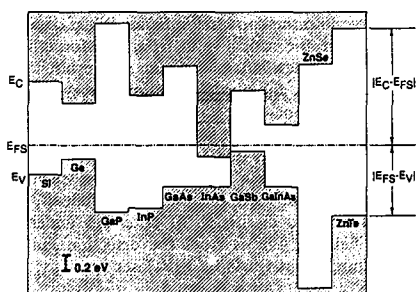


図1 VI族, III-V族, II-VI族半導体のフェルミレベル安定化エネルギーとバンド端の相対的なエネルギー関係^[11]。

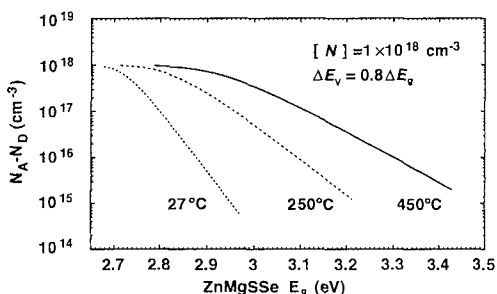


図2 両極性欠陥モデルによる実効アクセプター濃度の成長温度による改善の予測^[13]。

3 光材料研究分野での取り組み

3.1 両極性真性欠陥モデルにもとづいて

II-VI族半導体ではZnMgSSe系が短波長レーザー研究の中心となっているが, そのエネルギーギャップが増加するにつれて添加可能な実効アクセプター濃度が大幅に減少してしまう問題がある。この現

象も E_{FS} からフェルミレベルが離れていくことを考慮した両極性真性欠陥モデルで説明できる^[12]。このような傾向は単純なアクセプターの添加では避けることができないが, それでも半導体作製条件で改善される可能性は残っている。図2は両極性真性欠陥モデルにおいて, 成長温度の違いを考慮して計算したZnMgSSeのアクセプター濃度ドーピング限界である。この結果から, 基本的には成長温度を上げることによって実効アクセプター濃度は向上できることがわかる^[13]。実験的な確認は今後の課題である。

3.2 ZnTe:Liのデルタドーピング

図1からもわかるように, ZnSeではn型ドーピングしやすい一方, ZnTeではp型ドーピングしやすい。そこで非常に薄いp-ZnTeをZnSe層に埋め込んで実効的にp型ZnSeを形成する試みを行っている。具体的には1/3分子層のLiドープZnTeをZnSe 10 nmおきに挿入し, $4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の実効アクセプター濃度を獲得している^[14]。

3.3 LiとI(ヨウ素)の同時ドーピング

以上通常のドーピングでは, ある程度の濃度以上で不純物を補償する真性欠陥が生じ実現できる伝導度に限界が生じることを述べた。これは格子中の不純物原子が不安定化するためとも言換えることができる。こうした観点から, ドナーとアクセプターの同時ドーピングによりアクセプター原子を安定化し, 伝導度の限界を向上できる可能性が最近第一原理計算にもとづいて議論されている^[15]。現在その可能性を実験的に検討するため, LiとIの同時ドーピングを行っており, Liのみではn型になる不安定を示すのに対し, 同時ドーピングではp型反転することが確認できた^[16]。

[参考文献]

[1] S. Taniguchi, T. Hino, S. Itoh, K. Nakano, N. Nakayama, A. Ishibashi, and M. Ikeda, *Electron. Lett.* 32, 552 (1996).

[2] S. Nakamura et al, *Proc. Second Int. Conf. Nitride Semiconductors*(Tokushima, October 27-31, 1997) p. 444.

- [3] K. Ohkawa, T. Karasawa, and T. Mitsuyu, *Jpn. J. Appl. Phys.* 30, L152 (1991).
- [4] S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa, *Jpn. J. Appl. Phys.* 31, L139 (1992).
- [5] H. Okuyama, Y. Kishita, T. Miyajima, A. Ishibashi, and K. Akimoto, *Appl. Phys. Lett.* 64, 904 (1994).
- [6] A. Garcia and J. E. Northrup, *Phys. Rev. Lett.* 74, 1131 (1995).
- [7] C. G. Van de Walle, D. B. Laks, G. F. Neumark, and S. T. Pantelides, *J. Cryst. Growth* 117, 704-709.
- [8] A. Kamata, H. Mitsuhashi, and H. Fujita, *Appl. Phys. Lett.* 63, 3353 (1993).
- [9] D. J. Chadi and K. J. Chang, *Appl. Phys. Lett.* 55, 575 (1989).
- [10] W. Walkiewicz, *Phys. Rev.* 37, 4760 (1988).
- [11] E. Tokumitsu, *Jpn. J. Appl. Phys.* 29, 5, L698 (1990).
- [12] K. Kondo, H. Okuyama, and A. Ishibashi, *Appl. Phys. Lett.* 64, 25, 3434 (1994).
- [13] K. Hirano, I. Suemune, and G. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.* 36, L37 (1997).
- [14] J. Hirose, I. Suemune, K. Uesugi, M. Hoshiyama, and T. Numai, 1997 *Electronic Materials Conf.* (Fort Collins, June 25-27, 1997) V8.
- [15] 山本哲也, 吉田 博, *固体物理*, 32, 59 (1997).
- [16] 大澤英明, 鈴木英機, 俵 毅彦, 広瀬 淳, 末宗幾夫, 町田英明, 下山紀男, 1997年秋季応用物理学会 (1997年10月2-5日)2a-V-8.