



| | |
|--------------|---|
| Title | GaAs-AlAs超格子中の深いドナー準位DXセンター：深いエネルギー準位の束縛および共鳴エネルギーを制御する |
| Author(s) | 小堀, 裕己 |
| Citation | 大阪大学低温センターだより. 1994, 86, p. 10-14 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/6935 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

GaAs-AlAs 超格子中の深いドナー準位 DX センター

—深いエネルギー準位の束縛および共鳴エネルギーを制御する—

理学部 小堀 裕己 (豊中5242)

1. DX センターについて

1968年に、Clayford 等¹⁾は、 $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ ($0 \leq y \leq 1$) 中の S ドナーが伝導帯の下に深い準位を形成し、 $y > 0.3$ 、温度が100 K以下で永久光伝導を示す事を観測した。その後、同様な現象が $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 \leq x \leq 1$) 中の Sn、Si²⁾、Se についても見い出された。その時、これらの深いドナー準位の光学的なイオン化エネルギー (E_{opt}^i) が熱的なイオン化エネルギー (E_{Th}^i) と比較して、著しく大きい事が見いだされた。1977年に、Lang 等は³⁾、この深いドナー準位の 2 つの大きな特徴、(1)低温下での永久光伝導、(2) $E_{\text{opt}}^i > > E_{\text{Th}}^i$ 、を説明するために、図 1 に示されるような配位座標モデルを提唱した。図 1 で、熱平衡状態では、十分な低温下で、伝導電子は DX センターに束縛されている[1]。光によって DX センターから伝導帯に励起された電子は[2]、伝導帯のエネルギー準位に沿って、伝導帯の底に分布する[3]。この時、伝導電子は、十分な低温下では、伝導帯と DX センターとの間のエネルギー障壁 (E_A) を越えることができずに、伝導帯に留まり永久光伝導を示す様になる。温度を上昇させて、そのエネルギー障壁 E_A を越えることが出来ると、再び伝導電子は、DX センターに束縛されるようになる。また、光学的イオン化エネルギー E_{opt}^i は、熱的イオン化エネルギー E_{Th}^i よりも大きいことが、図 1 からわかる。この様に、Lang 等が提案した配位座標モデルを用いる事によって、DX センターの色々な物理的性質を説明することができる。DX センターの微視的構造は、現在でも論争中である。色々な微視的モデル⁴⁾が提案されているが、現在でも未解決であると言ってよい。

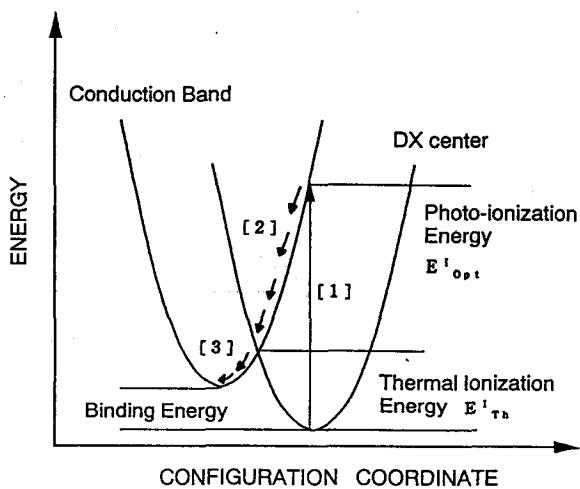


図 1 DX センターと伝導帯の配位座標モデル

2. $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 混晶半導体中の Si による DX センター

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0 \leq x \leq 1$) 中の Si による DX センターは、色々な半導体の中でも特に詳しく研究されており、 x が 0.22 以下では束縛エネルギーが負の共鳴状態 ($x = 0$ の GaAs では、伝導帯の上方、160 meV) 0.22 以上で正の束縛状態 ($x = 1$ の AlAs では、40 meV の束縛エネルギー) を形成することが知られている。

3. GaAs-AlAs 超格子中の Si による DX センター

3-1. 実験の動機

バルクの GaAs および AlAs 中の Si による DX センターは、それぞれ共鳴状態、束縛状態を形成するという意味で、両半導体は DX センターのエネルギー準位に関して対照的な位置関係にある。良く知られている様に、GaAs-AlAs 超格子中では伝導電子系は 2 次元性を持ち、そのエネルギー準位は量子閉じ込め効果によって昇位する。一方、DX センターが束縛状態にあるとき、束縛されている電子は格子定数程度に強く局在している事が実験的に確かめられている。したがって層厚が格子定数の数倍以上の超格子構造では、DX センターのエネルギー準位はほとんど変化を受けないと考えられる。これは超格子構造中に DX センターの様に、格子定数程度に強く局在した深い準位を形成する事によって、束縛あるいは共鳴エネルギーをある程度自由に制御できる事を意味している。

3-2. 試料

DX センターとして Si を $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の濃度で GaAs (P306) もしくは AlAs (P307) 領域に選択的にドープした 2 種類の GaAs-AlAs 単周期超格子を層厚が GaAs、AlAs ともに 25Å の 20 周期超格子構造について準備した。

3-3. 遠赤外サイクロトロン共鳴による永久光伝導の観測

図 2 に Si を GaAs 領域にドープした試料 P306 のサイクロトロン共鳴の吸収線が示してある。before、LED、after と書かれているのは、それぞれ発光ダイオード照射前、照射中、照射後 1 時間経過した後の吸収線を示してある。この吸収は超格子中の GaAs 領域の Γ 点でのサイクロトロン共鳴である事がその有効質量からわかる ($m_r/m_0 = 0.072$ 、 m_0 ：自由電子質量、バルクでは 0.067)。ここで、吸収強度は、伝導電子濃度に比例している。両試料ともに、照射前はほとんど吸収線を観測する事ができないが、照射後 1 時間した後も照射中とはほとんど変わらない吸収強度を示す事がわかった。すなわち、永久光伝導を示している。興味ある事に、両試料に関して、永久光伝導を観測した、この永久光伝導が超格子からの 2 次元電子に起因している事を、磁場を結晶成長方向に対して傾けたサイクロトロン共鳴の実験により、ピーク位置がシフトすることから確かめた。Si をドープしたバルクの GaAs では、永久光伝導は観測されない。Si を GaAs 中にドープした超格子の試料に関して、

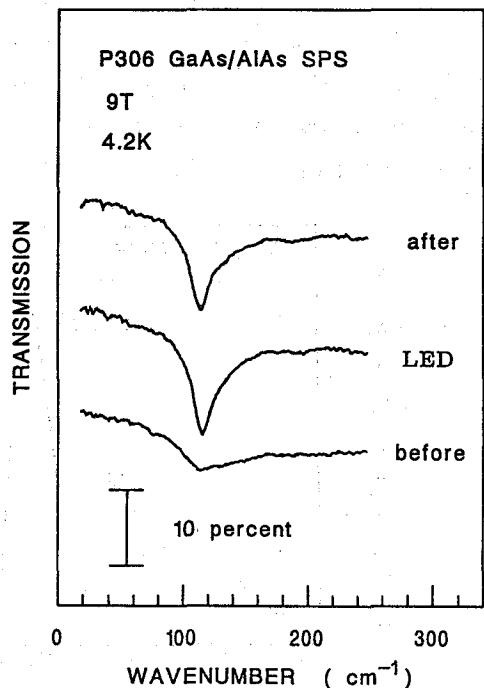


図 2 試料 P306 の発光ダイオード照射前、中、後の遠赤外サイクロトロン共鳴

永久光伝導を観測した事実を、伝導帯エネルギー準位の量子閉じ込め効果による昇位のためと考える。すなわち、DX センターが共鳴状態から束縛状態へと変化したためと考える。

3-4. DC 光伝導度スペクトル測定による DX センターの光イオン化エネルギーの測定

タングステン-ハロゲンランプをモノクロメーターで分光し $0.6\sim1.8$ eV にわたって光伝導度スペクトルを測定した（図 3 に P306 の結果を示す）。その光伝導度の立ち上がりから、DX センターの光イオン化エネルギーを評価した。両試料について得られた結果は、GaAs 領域ドープに関して 1.47 eV、AlAs 領域ドープに関して 1.35 eV である。また、この立ち上がりのエネルギーの所で、永久光伝導を観測した。

3-5. フォトルミネッセンス測定による超格子の伝導帯のエネルギー準位の測定

GaAs-AlAs 超格子の量子閉じ込め効果による GaAs および AlAs 領域の伝導帯の昇位エネルギーをフォトルミネッセンスの実験から見積もった（図 4 に P306 の結果を示す）。ここで type I および type II と表記してあるのは、バンド間遷移の type I 発光 : $\Gamma_e(\text{GaAs}) \rightarrow \Gamma_s(\text{GaAs})$ 及び type II 発光 : $X_e(\text{AlAs}) \rightarrow \Gamma_s(\text{GaAs})$ を示している。ここで、両試料ともに、type I および type II 発光のエネルギーは、それぞれ 1.88 eV および 1.78 eV である。Ehrenreich と Turnbull⁵⁾ の理論によると（図 5）、GaAs-AlAs 超格子のパルク GaAs の Γ 点から測っ

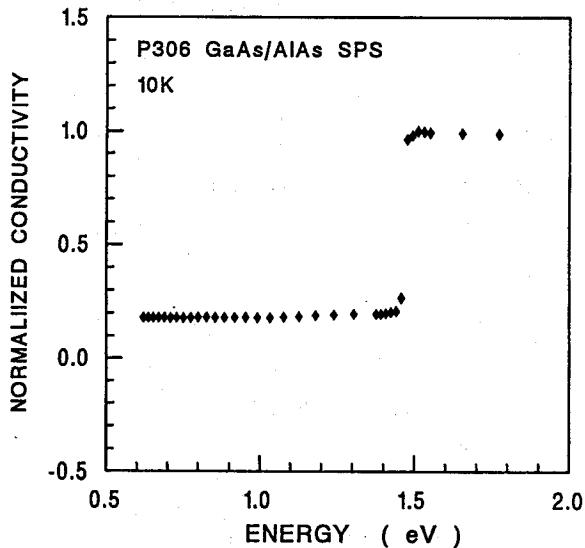


図 3 試料 P306 の DC 光伝導度スペクトル

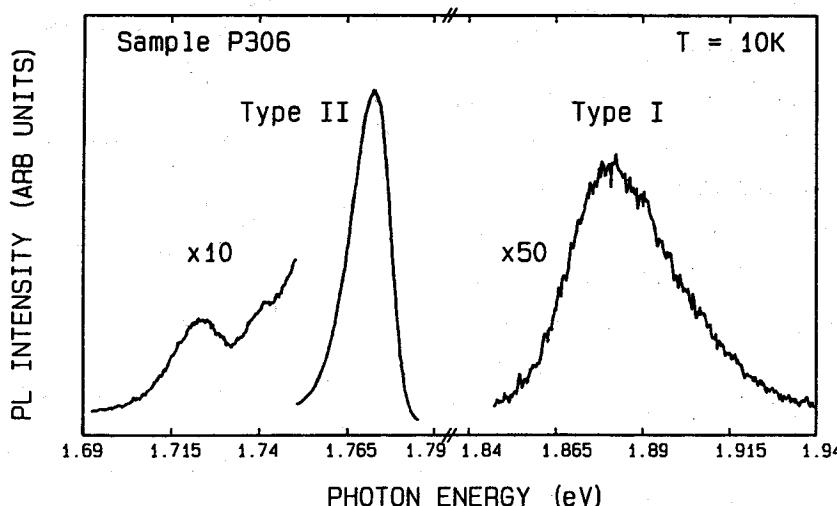


図 4 試料 P306 のフォトルミネッセンス・スペクトル

ての、伝導帯、価電子帯のエネルギーの増分は、この試料については、1周期分の層厚が50Åであるから、図5から $\Delta E_c(\text{GaAs})=0.28\text{ eV}$ 、 $\Delta E_c(\text{AlAs-GaAs})=0.08\text{ eV}$ 、 $\Delta E_v(\text{GaAs})=0.20\text{ eV}$ と評価され、10 Kでのバルク GaAs のバンドギャップエネルギーが1.52 eVであるから type I および type II 発光のエネルギーは1.88 eV、1.80 eVとなって、実験結果と良い一致が得られる。GaAs-AlAs ヘテロ構造をつくった場合、AlAs の伝導帯の最小点 (X点) は GaAs の伝導帯の最小点 (Γ 点) よりも 0.18 eVだけ大きいことがわかっている。したがって正味の AlAs 領域での伝導帯のエネルギー増加分は $\Delta E_c(\text{AlAs})=0.02\text{ eV}$ と評価される。

3-6. GaAs-AlAs 超格子中の DX センターのエネルギー準位の評価

DX センターは格子定数程度に強く局在した深いドナー準位であると考えられているので、今回用いられる様な層厚が格子定数の数倍以上の超格子構造では、エネルギー準位はほとんど影響を受けないと考えられる。ところが、伝導電子は超格子構造中で量子閉じ込め効果によって強く影響を受けるので、結果的に DX センターのエネルギー準位は伝導帯のエネルギー準位と比較して、大きく影響を受ける事になる。図6に超格子の GaAs および AlAs 領域にそれぞれ DX センターをドープした場合の配位座標を示す。興味ある事に、GaAs に対しては、DX センターはバルクの場合に共鳴状態にあったのが、超格子の場合には束縛状態にある事がわかる。すなわち、DX センターは超格子構造中につくる事によって、共鳴状態から束縛状態に転位したと見なす事ができる。このとき、束縛エネルギーは用いた試料に対して0.12 eVである。そのために、永久光伝導が観測できたと考えられる。また、この図から逆にバルクの GaAs の光イオン化エネルギーが1.19 eVであると評価できる。これは、バルクの GaAs では測

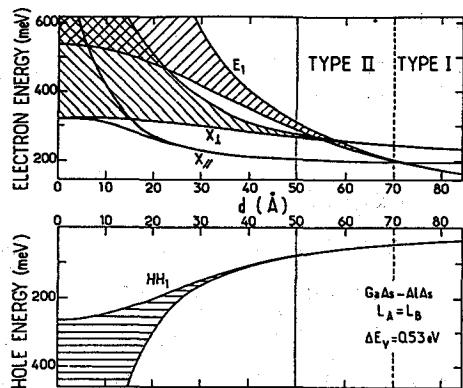


図5 Ehrenreich と Turnbull のエネルギーバンド理論曲線

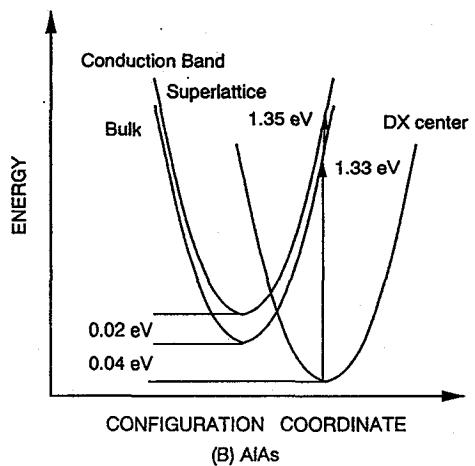
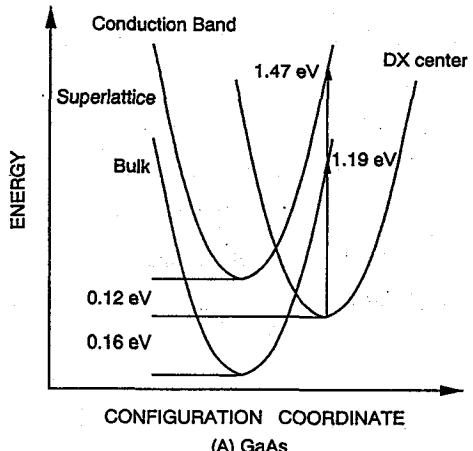


図6 GaAs-AlAs 超格子中の DX センターの配位座標モデル

定困難であった光イオン化エネルギーを超格子構造にする事によって評価できる事を意味している。同様にして AlAs についても評価でき、バルクの AlAs 中の DX センターの光イオン化エネルギーが 1.33 eV である事がわかり、これはバルクの AlAs 中の DX センターに対して求めた実験値と良い一致を示す。

4. 将来の指針

ここでは、25Å/GaAs、25Å/AlAs の GaAs-AlAs 超格子中の Si による DX センターについて考えたが、図 5 からわかるように、超格子中 GaAs 領域では DX センターと伝導帯が交わる層厚は～40Å である。もしこの層厚以上の試料を用いたならば、超格子構造といえども GaAs 領域中で永久光伝導を観測する事ができない事が期待される。このモデルが正しいかどうかの一つの検証となるであろう。今後はもし可能であるならば色々な層厚の試料を用いて実験を進めて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) M. G. Claford, G. E. Stillman, J. A. Rossi and N. Holonyak, Jr.: Phys. Rev. **168**, 867 (1968).
- 2) N. Chand, T. Henderson, J. Klem, W. T. Masselink, R. Fischer, Y. C. Chang and H. Morkoc: Phys. Rev. **B30**, 4481 (1984).
- 3) D. V. Lang and R. A. Rogan: Phys. Rev. Lett. **39**, 635 (1977).
- 4) E. Yamaguchi, K. Shiraishi and T. Ohno: J. Phys. Soc. Jpn. **60**, 3093 (1991).
- 5) H. Ehrenreich and D. Turnbull: Sol. Stat. Phys. **44**, 274 (1991).