

ポテンシャル障壁のコーティングがトンネル特性に及ぼす影響

山本 貴之・山田 徳史 (福井大学大学院工学研究科)

1 背景とテーマ

文献 [1] において単一矩形障壁や三角障壁に別の障壁構造を隣接させる“コーティング”を行うことでトンネル効果の透過係数を大きくできることが示された。本講演では、コーティングが透過係数を向上させるメカニズムを明らかにするとともに、文献 [1] で示されたコーティングの効果がデバイスを想定した構造においても見られることを示す。

2 解析方法

図 1 は単一矩形障壁を別の単一矩形障壁でコーティングした階段障壁構造である。図 1 の障壁構造に平面波 e^{ikx} が入射したときの透過波は $Te^{ik(x-w_1-w_2)}$ と表せる。 T は透過振幅であり、透過係数 $|T|^2$ はトンネル確率を表す。

コーティングされた障壁が組み込まれたデバイスのモデルとして図 2 のポテンシャル構造を考える。井戸領域内 ($w_2 < x < L$) の波動関数は

$$\psi(x, t) = \int f(k)C(k) \sin\{k(x-L)\}e^{-i\frac{\hbar k^2}{2m^*}t} dk$$

で与えられる。 $C(k)$ は境界条件により定まる接続係数であり、 $f(k)$ は重ね合わせの重みである。図 2 の場合、図 1 の透過係数に相当する量として、波束の井戸領域への浸入のしやすさ $\alpha = |C(k_n)|^2 \times \delta n$ (δn は共鳴波数 $k = k_n$ における共鳴の半値全幅) が考えられる。

3 不完全共鳴による透過係数の増大

透過係数がコーティングの幅 w_1 にどのように依存するのかを調べたところ、周期的に極大値をとることが分かった (図 3 (左))。さらに、透過係数が極大値をとるとき、次式が成り立っていることが分かった (図 3 (右))。

$$w_1 \simeq \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

ここで λ はコーティング領域における波動関数の波長である。式 (1) は共鳴条件の形をしている。このことは、コーティングにより透過係数が増大する原因は共鳴が起きるためであることを示している。階段障壁の透過係数の極大値は 1 未満のため、この共鳴は不完全共鳴である。

4 デバイスを想定した構造におけるコーティングの影響

文献 [2] で報告されたダイレクトトンネルメモリ (DTM) の一次元モデルを考え (図 2)、コーティングの影響を調べる。図 2 の井戸領域への波束の浸入のしやすさ α と図 1 の透過係数 $|T|^2$ とを比較した。比較は、図 1 の構造において不完全共鳴が起き透過係数が極大となる波数領域で行った。用いたパラメータの値は、 $w_1 = 1.0\text{nm}$ 、 $V_1 = 2.5\text{eV}$ 、

$w_2 = 1.0\text{nm}$ 、 $V_2 = 3.3\text{eV}$ 、 $L - w_2 = 1000.0\text{nm}$ 、 $x_0 = -5.0\mu\text{m}$ 、 $\Delta x = 1.0\mu\text{m}$ である。

図 4 に結果を示す。図より、 α と透過係数の k 依存性は同様である。つまり、図 1 の構造に関して先行研究が見出したコーティングの効果は、デバイスを想定した図 2 の構造においても維持されている。図 2 の構造では、井戸領域において左進行波と右進行波が干渉するため、図 1 とは状況が大きく異なる。それに関わらずコーティングの影響が図 2 の構造でも見られることは自明ではない。

5 まとめ

ポテンシャル障壁をコーティングしたときに見られる透過係数の増大 [1] は不完全共鳴が原因である。また、デバイスを想定した構造にコーティングされた障壁を組み込んだ場合でも、コーティングの効果は維持される。

今後の課題は、透過係数の増大がより大きく現れるコーティングの方法を検討することである。

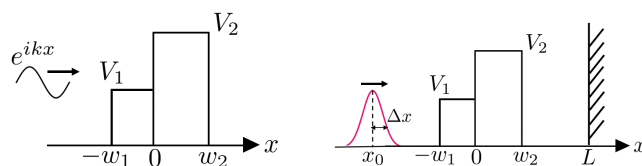


図 1: コーティングされた障壁構造

図 2: コーティングされた障壁を組み込んだ DTM 構造

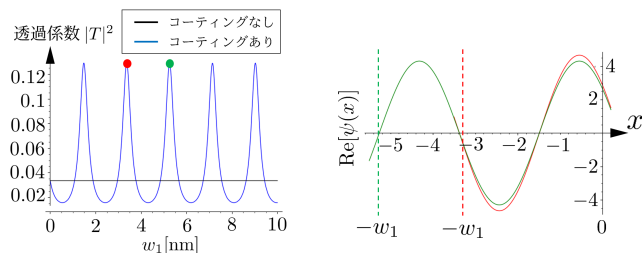
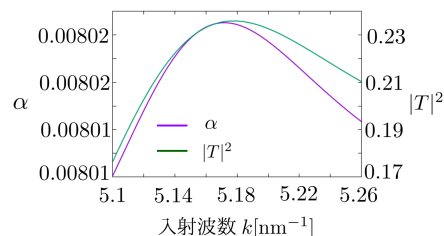


図 3: 透過係数に見られるピーク構造 (左) とコーティング領域における波動関数 (右)

図 4: 波束の浸入のしやすさ α と透過係数 $|T|^2$ の比較

参考文献

- [1] Zijun C. Zhao and David R. McKenzie, Scientific Reports **7**, 12772 (2017).
- [2] 二木俊郎, 白杵達哉, 堀口直人, FED ジャーナル **11**(4), p.67 (2000).