

Possibility & Limitation of 1D Nano Scale Electron Shielder

나노 구조물을 이용한 전자선 차폐 가능성과 한계

Sung Jun Ahn, Bumsu Lee, Chong Yeal Kim, O Bong Yang, Hyung Sik Shin

Center for Advanced Radiation Technology, Chonbuk National University

안성준, 이범수, 김종일, 양오봉, 신형식
전북대학교 공학연구원 첨단방사선응용연구센터
전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

kimbo@chonbuk.ac.kr

Abstract

The possibility and limitation of one dimensional nano scale electron shielder is briefly discussed. A Nano scale electron shielder will reduce the weight and size of shielding materials. However, practical application still requires further research. In this work, we discuss general problems related to nano scale electron shielder, by taking an arbitrary one dimensional potential barrier as an example.

Key word : nano scale electron shielder, quantum transmission, quantum reflection

요 약

나노 규모의 1차원 양자 구조물을 이용한 전자선 차폐 가능성에 관한 이론적 배경과 한계를 정리한다. 나노 구조물을 이용한 전자선 차폐는 차폐재의 경량화와 소형화에 크게 기여할 것으로 예상되나, 실용화를 위해서는 아직 연구되어야 할 분야가 많다. 임의의 1차원 포텐셜 장벽을 대상으로 양자투과계수 계산을 실행하여, 나노 구조물의 전자선 차폐와 관련된 문제점들을 살펴본다.

중심단어 : 나노 규모 전자 차폐장치, 양자 투과, 양자 반사

1. 서론

1974년 에사키(Leo Esaki)의 논문[1]이 발표된 이후, 지난 30여년에 걸쳐 나노 규모의 양자 구조물에 대한 기초적인 연구와 실용적 응용에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 나노 양자 구조물에 관한 연구는 크게 1차원 양자 현상을 이용하는 양자 우물(quantum well)과 초격자(superlattice) 그리고 3차원 현상을 응용하는 양자 점(quantum dot)으로 나누어질 수 있다. 나노 양자 구조물 연구의 핵심은 자연상태에 존재하지 않는 인위적인 양자 상태를 보유한 구조물을 제작하여, 그것의 전기 및 광학적 특성을 활용하는 것이다.

그중에서도 가장 기본적인 관심영역은 대부분 양자역학 교과서의 연습문제에서 흔히 찾아볼 수 있는 전자의 간섭공명 투과(Coherent Resonant Tunneling) 현상이다. 사실 화합물반도체의 에너지 띠간격(band gap)을 이용해서 이러한 구조물을 실제로 제작할 수 있다는 에사키의 아이디어가 나노 구조물 연구의 출발점이기도 하다[2]. 그리고 지금까지 공명투과에 관한 많은 실험[3,4] 및 이론적[5,6] 연구가 진행되어 왔지만, 또 다른 응용영역인 반사 및 차폐에 관한 응용 연구는 그리 활발하지 않다. 이 글에서는 나노 구조물을 이용한 전자 차폐의 가능성과 한계를 살펴본다.

이 글의 구조는 다음과 같다. 다음 2절은 임의의 1차원 나노 구조물에 입사하는 전자의 투과와 반사에 관한 이론을 정리하고, 3절에서는 임의의 양자구조물에 대하여 계산한 투과계수를 바탕으로 양자 구조물을 이용한 전자선 차폐의 가능성과 한계를 살펴본다. 마지막 4절에서는 이 글의 내용을 간략히 정리한다.

2. 이론

그림 1과 같이, 임의의 전자선 차폐재(물질 A) 내부에 전기적 포텐셜 장벽의 역할을 하는 나노 규모의 박막층(물질 B)이 삽입되어 있는 1차원 구조물을 가정해보자. 일반적으로 전기적 포텐셜 장벽은 두 물질의 에너지 띠 간격 (energy band gap)에 의해 결정된다. 그리고 물질 A의 두께가 물질 B의 두께에 비해 매우 크다면, 나노 박막층에 의한 효과는 일반적인 포텐셜 장벽에 의한 전자 산란문제와 같이 취급될 수 있다.

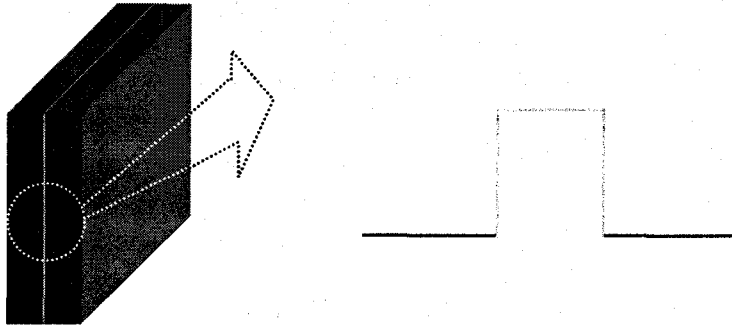


그림 1. 1차원 나노 포텐셜 장벽

물질 A 내에서 유효질량이 m^* 인 전자가 박막층의 왼쪽에서 입사한다면, 박막층에 의한 포텐셜 장벽과 산란한 후에 전자는 다음과 같은 경계조건을 만족시킨다.

$$\psi^{(+)}(k_a, \vec{k}_b) \rightarrow e^{ik_a x} \delta_{\vec{k}_a, \vec{k}_b} + f(k_a, \vec{k}_b) e^{i\vec{k}_b \cdot \vec{x}} \quad (1)$$

위의 식에서 k_a 와 \vec{k}_b 는 각각 입사전자와 방출전자의 파동벡터이다. 그림 1의 경우, \vec{k}_b 는 $+k_b$ (오른쪽 방향)과 $-k_b$ (왼쪽 방향)을 가질 수 있다. 그리고 $f(k_a, \vec{k}_b)$ 는 입사상태 k_a 에서 방출상태 \vec{k}_b 로 전이되는 1차원 산란진폭이다. 그렇다면 투과계수 $S(k_a, k_b)$ 와 반사계수 $R(k_a, k_b)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S(k_a, k_b) = \frac{k_b}{k_a} |\delta_{k_a, k_b} + f(k_a, k_b)|^2 \quad (2)$$

$$R(k_a, -k_b) = \frac{k_b}{k_a} |f(k_a, -k_b)|^2 \quad (3)$$

만약 구조물의 크기가 작아 비탄성 산란의 효과를 무시할 수 있다고 가정하면, 즉 $k_b = k_a$ 라고 하면, 산란진폭 f 는 T-행렬의 대각원소들로 표현될 수 있다.

$$f(k_a, \pm k_a) = \frac{m^*}{ik_a \hbar^2} T(k_a, \pm k_a) \quad (4)$$

그리고 그림 1과 같은 구조물을 포텐셜 $V(x)$ 로 기술할 수 있다면, T-행렬은 다음과 같다.

$$T(k_a, \pm k_a) = \langle e^{\pm ik_a x} | V(x) | \phi(k_a) \rangle \quad (5)$$

위의 식에서 $\phi(k_a)$ 는 다음과 같은 방출경계조건을 만족시키는 파동함수이다.

$$(E_a - T_a) \phi^{(+)}(k_a, x) = V_a(x) \phi^{(+)}(k_a, x) \quad (6)$$

식(6)에서 E_a 는 전자의 입사에너지이고 T_a 는 운동에너지 연산자이다. 식(2), (3), (5)를 이용하면, 투과계수 S 와 반사계수 R 을 각각 다음과 같이 쓸 수 있음을 알 수 있다.

$$S(k_a, k_a) = \left| 1 + \frac{m^*}{ik_a \hbar^2} \langle e^{ik_a x} | V_a(x) | \phi^{(+)}(k_a) \rangle \right|^2 \quad (7)$$

$$R(k_a, -k_a) = \left| \frac{m^*}{ik_a \hbar^2} \langle e^{-ik_a x} | V_a(x) | \phi^{(+)}(k_a) \rangle \right|^2 \quad (8)$$

3. 계산

그림 2는 전자의 입사에너지에 따른 투과율의 변화를 보여주는 일반적인 그림이다. 이 그림에서 전자의 유효질량은 0.1 m_0 (전자질량), 포텐셜 장벽의 넓이와 높이는 각각 10nm와 1eV이다. 이와 같은 계수의 값들을 선택한 이유는 지금까지 많은 연구가 이루어진 반도체화합물을 이용한 나노 구조물들의 경우에 적용되는 일종의 표준적인 수치들이기 때문이다. 포텐셜 장벽의 높이인 1eV 이하에서는 거의 투과가 일어나지 않으며, 에너지가 장벽의 높이보다 커지면 파동함수가 박막층을 중심으로 변갈아 가며 반대칭(antisymmetric)과 대칭(asymmetric)의 모습을 취하면서 나타나는 투과계수가 1이 되는 정점들을 볼 수 있다.

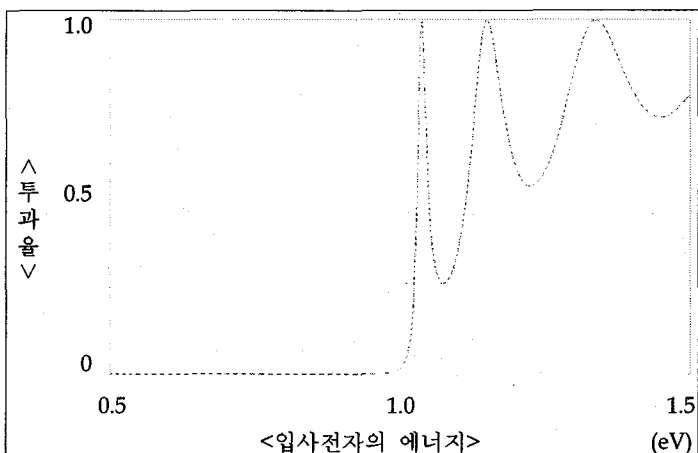


그림 2. 전자의 입사에너지에 따른 투과율의 일반적 변화

그림 2와 같이 주어지는 일반적 형태로 주어지는 일반적인 투과계수의 변화에 영향을 미치는 변수는 모두 3가지이다. 그것들은 포텐셜 장벽의 높이와 넓이 그리고 유효질량이다. 이 변수들에 의한 변화를 살펴보고자 하자. 먼저 그림 3은 장벽의 높이의 변화에 따른 투과율의 변화를 비교하고 있다. 실선과 점선은, 전자의 유효질량과 장벽의 넓이는 각각 $0.1m_e$ 과 $10nm$ 로 동일하지만, 장벽의 높이가 각각 $0.5eV$ 와 $1.0eV$ 인 경우의 투과계수를 그리고 있다. 두 경우 모두 장벽의 높이 이하에서는 거의 투과가 일어나지 않음을 알 수 있다. 따라서 가장 확실한 차폐의 방법은 장벽의 높이를 높이는 것임을 보여준다. 하지만 최근 많이 응용되고 있는 GaAlAs, SiGe 등 반도체화합물을 이용하여 얻을 수 있는 장벽의 높이는 수 eV 정도이다. 그리고 절연체인 다이아몬드의 띠틈격도 $7eV$ 에 불과하여 결정구조를 가지는 물질들로부터 얻을 수 있는 장벽의 높이에는 한계가 있다. 물론 정점들 사이의 계곡을 이용하여 차폐하는 것이 가능하지만, 그러한 효과를 이용하는 것도 한계가 있을 보여준다. 대략적으로 입사에너지가 포텐셜 장벽의 2배를 초과하면 투과율이 1에 가깝기 때문이다. 따라서 그림 3은 화합물반도체 나노 구조물을 이용하여 차폐할 수 있는 에너지의 한계가 최대 $10eV$ 를 넘지 못한다는 것을 보여주고 있다.

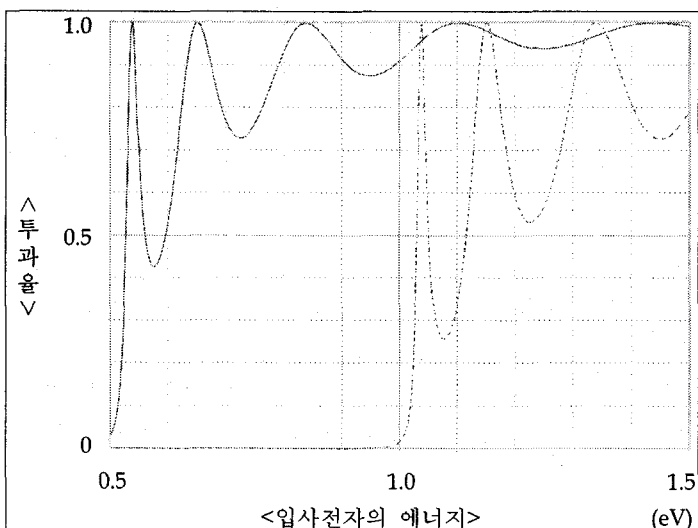


그림 3. 장벽의 높이에 따른 투과율의 변화

그림 4는 장벽의 두께에 따른 투과율의 변화를 나타낸다. 점선과 실선은 유효질량과 장벽의 높이는 $0.1m_e$ 과 $1eV$ 로 동일하지만, 장벽의 두께가 각각 $20nm$ 와 $10nm$ 인 경우의 투과율을 나타낸다. 이 그림은 장벽의 두께가 얇을수록 양자효과에 의한 차폐효과가 우수함을 보여준다. 장벽의 두께가 커지면 그와 함께 정점들 사이의 간격이 가까워지고, 장벽의 두께가 지나치게 커지면 정점들이 거의 연속적으로 존재하여, 뉴턴역학에 따른 고전적 결과와 유사한 결과를 준다.

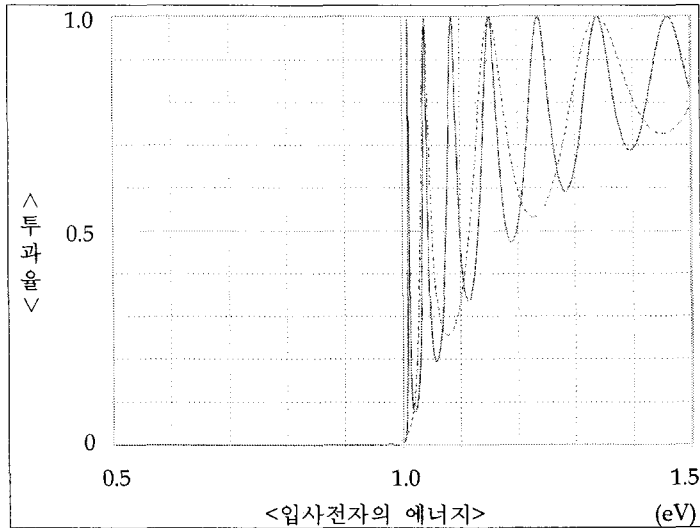


그림 4. 장벽의 두께에 따른 투과율의 변화

그림 5는 전자의 유효질량에 따른 투과율의 변화를 보여준다. 점선과 실선의 유효질량은 각각 $0.2m_e$ 과 $0.1m_e$ 이며, 장벽의 높이와 넓이는 $1eV$ 와 $10nm$ 로 동일하다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 유효질량이 커지면 양자상태 사이의 간격이 작아져 정점들 사이의 간격이 작아져 차폐효과가 떨어짐을 보여준다. 따라서 가급적 유효질량이 작은 물질을 사용하는 것이 차폐에 유효하다는 것을 알 수 있다.

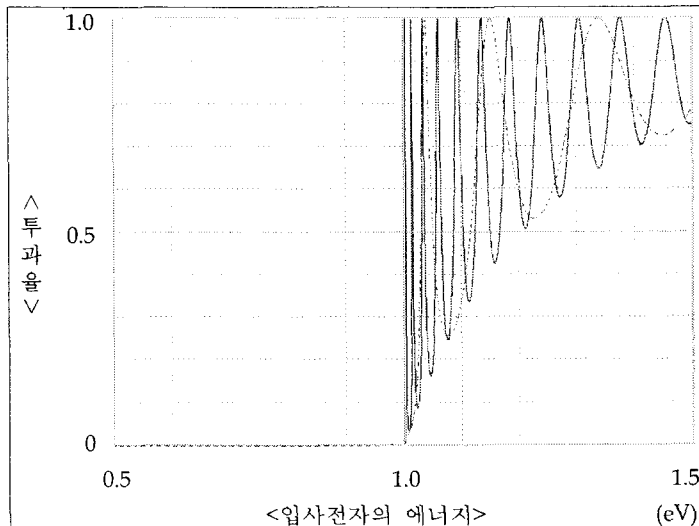


그림 5. 유효질량의 변화에 따른 투과율의 변화

4. 정리

나노 규모의 1차원 포텐셜 장벽을 이용하여, 전자선 차폐의 가능성과 한계에 대해 간략히 살펴보았다. 나노 박막층을 이용한 전자선 차폐에 있어 가장 중요한 것은 차폐하고자 하는 전자의 에너지보다 높은 포텐셜 장벽의 높이를 확보하는 것이다. 그러나 잘 알려진 사실과 같이, 현재 활용되고 있는 반도체화합물이나 결정형 부도체를 이용해서는 구축할 수 있는 장벽의 높이가 수 eV에 불과하다. 그러므로 이를 이용하여 전자를 차폐하는 것은 가능하지만, 차폐할 수 있는 전자 에너지의 한계가 최대 10eV에 불과하다는 것을 말해준다. 고에너지 전자의 차폐를 위해서는 큰 에너지 띠틈격을 가지는 부도체를 활용한 나노 구조물에 관한 연구가 필요하다는 것을 알 수 있지만, 이에 관한 연구는 아직 활발하지 않다. 나노 전자선 차폐체의 개발을 위해서는 나노 절연체에 관한 연구가 반드시 선행되어야 한다. 부가적으로 장벽의 두께가 작을수록 그리고 전자의 유효질량이 작아서 드브로이 파장이 길수록 차폐효과가 우수함도 살펴볼 수 있다.

참 고 문 헌

1. R. Tsu and L. Esaki, Appl. Phys. Lett. 2, 562 (1974)
2. L. L. Chang and L. Esaki, Appl. Phys. Lett. 24, 593 (1974).
3. K. K. Choi, P. G. Newman and G. J. Iafrate, Phys. Rev. B41, 10250 (1990).
4. C. H. Kuan, D. C. Tsui, and K. K. Choi, Appl. Phys. Lett. 61 (4) 27 (1992)
5. A. S. Davydov and V. N. Ermakov, Physica 28D, 168 (1987)
6. C. Y. Kim, S. K. Kim, H. Miyazaki, and T. Watanabe, J. Kor. Phys. Soc. Vol. 29, 266 (1996).