

항전정 4학년 1등이 전하는 학습 노하우!

- 물리전자공학, 반도체소자 학습법 -

항공전자정보공학부 16학번 박○○

○ 과목 소개 및 에세이 작성 동기

제가 학습 노하우를 알려드릴 과목은 항공전자정보공학부의 전공 과목인 **물리전자공학**과 **반도체소자** 과목입니다. 이 두 전공 과목의 학습법을 알려드리기로 결정한 이유는 첫 번째로 제 주위의 많은 동기들과 선배, 후배분들이 2학년 2학기과 3학년 1학기에 수강하는 과목 중 가장 어려워하는 과목이기 때문입니다. 뉴스와 인터넷 등에서 몇 년째 들리는 반도체 업계 호황과 높은 성과금에 대한 소식으로 인해 반도체 분야의 기초 중에 기초 전공과목인 물리전자공학은 회로이론1과 같이 항공전자정보공학부 학생이라면 거의 필수적으로 수강해야할 과목으로 자리를 잡았습니다. 하지만 많은 학생들이 초반부터 시작하는 양자역학에 지레 겁을 먹고, 그 이후에 나오는 난해한 이론과 식들 때문에 수업을 따라가지 못하고 “아! 반도체는 내 길이 아니다” 하고 포기하는 학생들이 많이 보입니다. 그 이후에 이어지는 과목인 반도체 소자도 자연스레 수강하지 않게 되는데, 본인이 반도체 소자 쪽이 아니라 회로설계 등으로 나아가더라도 반도체 소자에 관한 지식은 필요하기 때문에 물리전자공학을 잘 들어서 반도체 소자까지 들었으면 하는 바람입니다.

두 번째로 제가 위의 두 과목에서 좋은 성적을 거두었고, 관련 분야로 종합설계 과목도 수강중이기 때문에 다른 어느 학생보다 자신 있게 학습 노하우를 전달할 수 있을 거라 생각하여 많은 전공 과목 중에서 위의 두 과목을 학습 노하우를 전할 과목으로 선정하였습니다.

○ 학습법 세부 내용

[학습법에 들어가기에 앞서...]

많은 학생들이 자신의 진로를 정할 때 성적이 잘 안 나오는 과목은 기피하고, 본인의 성적이 잘 나오는 과목들을 따라가기 때문에, 전공 과목에서 성적을 잘 받는다는 것은 자신의 진로를 선택할 수 있는 기회를 넓히는 것이라고 할 수 있습니다. 따라서 이 글은 위의 두 전공 과목에서 좋은 성적을 받기 위한 것에 초점이 맞춰져 있으며, 이를 위한 이론적 이해에 관해서는 각기 필요한 곳에서 부분적으로 얘기할 예정입니다.

항공전자정보공학부에는 많은 전공 과목이 있고, 트랙 또한 5개 정도의 트랙이 있습니다. 여기서 각 과목별로 요구하는 전공에 대한 이해 정도와 공부 방법이 다르며, 같은 과목을 듣더라도 그 강좌의 담당 교수님의 스타일에 따라서도 공부법은 상당히 달라지게 됩니다. 이러한 과목별, 담당 교수님 스타일에 따른 적절한 공부 방법을 알아야 위의 두 과목뿐만 아니라 다른 과목들에도 효율적인 시간 분배가 가능하며, 전체적으로 좋은 성적을 거둘 수 있습니다. 다행히도 물리전자공학과 반도체소자 과목을 강의하시는 교수님 세분의 시험 문제들을 족보와 실제 수강하면서 풀어본 결과 세분의 시험 스타일이 크게 다르지 않아 제가 알려드리는 학습

노하우를 잘 습득하시면, 좋은 성적을 거둘 수 있을 것입니다.

[과목 전반적인 학습법]

1. 속독보다는 정독을 하라!

주위에서 물리전자공학과 반도체소자를 어려워하는 동기와 선, 후배들을 보면 그 이전에 전자기학 또한 어려워하는 것을 볼 수 있는데, 위 과목들의 공통점은 양이 많지는 않으나 다른 전공 과목들에 비해 상대적으로 내용에 깊이가 있어, 처음 수업을 듣거나 책을 읽었을 때 쉽게 받아들여지지 않는다는 것입니다. 어떤 과목은 내용 자체는 상식적으로 이해가 가는데 양이 많은 반면, 어떤 과목은 눈에 보이지도 않고, 그냥 봤을 때 상식적으로 이해가 잘 안 되는 과목이 있는데 위의 두 과목은 후자에 속하는 경우입니다.

이런 스타일의 과목을 공부하기 가장 좋은 방법은 천천히 정독을 하는 것입니다. 보통 식을 유도하기 전에 그림을 하나 주고, 그림으로부터 물리적인 계들을 가정하기 시작하면서 식의 유도를 진행하는데 이때 꼭! 진도를 나가는 속도가 느리더라도 직접 식들을 유도해보고 그림을 그려보면서 이해를 해나가는 것이 중요합니다. 책을 안보고 유도하는 것이 아니라 책의 유도과정을 천천히 따라가면서 직접 손으로 써보는 것이 중요합니다.

평소에 속독을 하는 식으로 공부하는 친구들의 경우 이러한 과정을 놓치는 경우가 많은데, 물리전자공학과 반도체소자의 경우 식이 비슷한 모양을 가지는 경우가 많고, 또한 그 안에서도 P_n , N_p 등과 같이 비슷한 느낌의 변수들이 많기 때문에 식을 직접 유도하지 않고, 빠르게 여러 번 읽어서 이해를 하려고 하면 나중에 문제를 풀 때 공식을 알고 있더라도 어떻게 적용해야하는지 헛갈리기가 쉽습니다. 이렇게 식을 직접 유도 해보아야 각 항이 가지는 의미를 정확하게 이해 할 수 있고, 유도를 해보지 않고 공식만 그냥 외우는 것에 비해 이해도가 훨씬 높아서 처음 정독할 때 한 번씩 유도를 해보는 것을 추천합니다. 이것은 물리전자공학과 반도체소자뿐만 아니라 전자기학1, 2와 마이크로파공학 같은 양이 많지는 않으면서 난이도가 높은 모든 과목들에 해당하는 학습법입니다.

2. 날을 잡고 한 과목만 공부하라!

종합설계 과목을 수강하면서 담당 교수님이 하셨던 말씀 중 기억에 남는 것은 ‘연구를 진행하려면 조금씩 끊어서 하는 게 아니라 날을 하루 잡고 끝낸다는 생각으로 해야한다’는 것입니다. 앞서 말했듯이, 물리전자공학과 반도체소자의 경우 다른 과목들에 비해 난이도가 높은 편이기 때문에 천천히 정독하는 형식으로 공부를 해야 합니다. 많은 전공 책의 내용들이 새로운 이론과 공식 등을 소개하면 그것을 이용해서 다음 식들을 유도해내는 식으로 진행되는 데, 한 과목을 계속 공부하면서 이론과 공식 등을 외우면서 진행을 하면 다음에 이어지는 식의 전개나 유도를 큰 거부감이 없이 소화할 수 있습니다. 하지만 여러 과목을 조금씩 학습하는 식으로 진행을 하게 될 경우, 앞서 외웠던 공식들과 이론들을 잊어버리기 때문에 다음에 이어지는 내용을 받아들이기 힘들게 됩니다. 따라서 위의 두 과목과 같이 학습하는데 시간이 오래 걸리는 과목들은 주말이나 평일 시간이 많은 날을 하루 잡고 공부를 하는 것이 좋습니다.

3. 휴식은 예제를 풀고 난 후에 취하라!

공부를 할 때 맥락과 흐름을 이해하는 것은 굉장히 중요합니다. 저는 전공 공부를 하면서 휴식은 웬만하면 단원의 한 절이 끝날 때에 맞춰서 취하려고 합니다. 단원 하나는 여러 개의 절로 이루어져 있고, 각 절은 각기 다른 내용들을 포함하고 있습니다. 절을 끝내기 전에 중간에 휴식을 취하는 것은 앞에 내용을 잊어버리게 하고, 다시 앞에 읽었던 내용을 반복하여 읽게 하므로써 공부의 효율성을 낮추는 행동이라고 생각합니다. 한 절을 끝내기 전에 집중력이 흐트러지는 경우, 한 절을 끝내는 것을 목표로 하지 말고, 예제를 기준으로 휴식을 취하는 것도 좋습니다. 보통 각 절마다 한 개 이상의 예제들을 포함하고 있는데 예제는 단순히 알고 있는 것을 확인하는 역할이 아니라 앞에서 의미나 사용법을 이해하지 못한 공식들을 어떻게 사용하는지 보여주는 것이므로 각 절을 끝내지 못하더라도 예제만큼은 꼭 풀어보고 휴식을 취하는 것을 권장합니다.

위의 3번 항목을 지키지 못하는 대표적인 예가 공부하는 중간에 휴대폰을 사용하는 경우입니다. 공부를 하다가 어려운 내용이 나오거나, 문제 등을 풀다가 이해하지 못하는 경우 습관적으로 휴대폰을 켜서 유튜브, 인스타그램, 에브리타임, 웹툰 등을 보는 학생들이 있는데, 이러한 행동은 공부에 집중을 하지 못하게 하는 것도 문제이지만, 깊게 생각하는 습관 자체를 없애버리는 행동이라고 생각합니다. 저의 경우도 저번 학기에 공부 중에 핸드폰을 만지는 경우가 많았는데, 저번 학기에 제가 주위 동기들에게 몇 번 했던 말이 “나 왜 이렇게 멍청해진 거 같지?” 라는 말이었습니다. 학습 능력뿐만 아니라 문제 풀이 능력 자체를 떨어트리는 행동이라고 생각하므로 최소한 예제를 풀 때까지는 사용하지 않거나, 가방 깊숙한 곳에 넣어서 보관하는 것을 추천합니다.

[단원별 학습법]

물리전자공학과 반도체소자는 한 권의 책을 가지고 학기를 나눠 수업을 진행하기 때문에 단원별 학습법으로 접근을 하겠습니다.

1단원: 1단원의 경우 수식의 전개보다는 주로 물리전자공학을 공부할 때 필요한 배경지식이 될 만한 내용들과 정성적인 이론 내용들로 구성되어 있습니다. 여기서 공정 과정(에피택셜)을 깊게 보실 필요는 없습니다. 시험에서 각 공정을 정확히 설명하라거나 화학 반응식을 적으라는 교수님은 없기 때문에 각각의 에피택시가 어떤 장점을 갖고, 어디에 사용되는지 정도만 외워두시면 됩니다. 예를 들면, ‘분자선 에피택시는 에피택셜시 원자들의 비율을 정확히 조절 가능하지만 낮은 성장속도를 가진다’ 정도만 외워두시면 됩니다. 1단원에서 중요한 부분은 기본셀(primitive cell)과 단위셀(unit cell)의 차이를 알아야하며(번역본 기준 21p에 나와 있음), 입방격자 구조와 다이아몬드 격자구조에 대한 정확한 이해를 하는 것이 중요합니다. 충전율을 구하라는 것과 원자들의 체적밀도, 면적밀도(예를 들면, (100) 면 위의 원자들의 밀도)를 구하는 예제들은 시험에도 잘 나오는 문제들이므로 확실히 이해하고 넘어가야 합니다. 그 외에는 교수님들이 내신 과제 문제 등을 푸는 정도의 양으로만 공부를 해주시면 됩니다.

2단원: 2단원의 경우 양자역학이 나오면서 학생들이 애를 먹게 되는 단원인데, 앞부분에 나오는 광전효과 부분은 내용 자체가 ‘이런 식들이 발견되었다’ 라면서 식을 소개하는 내용이기 때문에 나오는 식들은 이해하려고 하지 말고, 외우시는 걸 추천 드립니다. 뒤에 이어지는 원

자 스펙트럼과 보어의 모형에 관한 절은 라이먼, 발머, 파셴 계열에 관한 식을 외우시면 되고, 그 후에 이어지는 양자역학에 관한 절에서 확률밀도 함수에 관한 부분은 시험과 과제 문제로 내기 좋은 부분이니 주의 깊게 보시고 예제도 풀어보시기 바랍니다. 슈뢰딩거의 파동방정식은 공학수학을 배웠으면 어렵지 않게 유도를 할 수 있으나, 전위우물 문제와 터널링 부분이 좀 더 중요하므로 이 부분을 중점적으로 봐주시면 됩니다. 그리고 양자수, 주양자수와 같은 것들과 주기율표 부분은 확실히 외워 두셔야 합니다. 문제의 경우 예제와 과제로 나오는 문제 정도만 확실히 익혀두시면 됩니다.

3단원: 3단원은 중간고사 시험 범위에서 가장 비중이 큰 부분이라고 할 수 있습니다. 정량적인 내용뿐만 아니라 정성적인 내용도 중요한 단원입니다. 여기서 배운 내용은 나중에 물리전자공학의 기말고사 범위와 반도체소자를 이해하는 기본 바탕이 되므로 앞의 단원들 보다 좀 더 많은 시간을 투자하여 공부하셔야 합니다. 다만 유효질량의 경우 식이 있지만 직접 계산하기 까다롭고, 유효질량 자체를 문제를 풀 때 직접 사용하는 경우는 드물기 때문에 이해가 안 될 경우 가볍게 넘어가 주시면 됩니다. 3단원에서 가장 중요한 부분은 페르미 준위에 관련된 내용이므로 이 부분에 관한 내용은 확실히 알고 있어야 하며, 자주 나오는 문제로는 $E_i - E_F$ 를 구하는 것과 같은 스타일입니다. 진성 캐리어와 평형상태의 캐리어의 차이를 명확히 인지하며, 평형상태일 때 $n_o p_o = n_i^2$ 과 같은 식들을 예제 문제와 과제 문제, 연습 문제들을 통하여 사용법을 익혀야 합니다. 예제와 과제뿐만 아니라 과제 문제와 비슷한 유형의 연습문제들 까지 같이 풀어주시는 게 좋으며, 300K, 400K 일 때의 진성캐리어농도 n_i 는 외워두셔야 문제 풀 때 수월합니다. 홀 효과도 중요한 파트라고 할 수 있습니다.

4단원: 4.3절까지는 책을 읽으면서 정성적인 내용은 이해를 하되, 예제를 위주로 공부해 주시는 게 좋고, 4.3.3의 의사(quasi) 페르미준위의 경우 나중에도 많이 나오므로 무엇을 의미하는지 잘 이해하셔야 합니다. 4.4.1의 확산과정부터는 5단원과 연계 되는 게 많으므로 천천히 읽으면서 각 식이 어떤 것을 의미하는지 파악해보면서 진도를 나가는 것이 좋습니다. 식들이 많기 때문에 예제와 과제 문제, 과제와 비슷한 유형의 연습문제들을 통해 자주 사용되는 식들을 위주로 외워주시면 됩니다.

5단원: 기말고사에서 큰 비중을 차지하는 단원입니다. 8대 공정에 관한 내용이 나오는데, 이 부분은 교수님마다 경중여부가 다를 수 있으므로 수업을 듣는 교수님에 맞춰 공부를 해야 합니다. 공부를 하실 거라면 책보다는 인터넷, 유튜브에 관련 내용이 잘 정리되어 있으므로 인터넷과 유튜브를 활용하시면 됩니다. 5단원의 경우 양이 워낙 많기 때문에 네모칸으로 강조된 주요식들만 우선적으로 외우고, 예제 문제들을 풀면서 사용되는 공식들을 외워주는 것이 효율적입니다. 시험문제가 예제, 과제, 연습문제와 비슷한 스타일이기 때문에 이론이 이해가 안 되시면, 문제풀이를 통해 이론을 이해해보시는 것도 하나의 좋은 방법입니다.

6단원: 여기부터는 반도체 소자의 단원인데, 6단원의 양이 방대하기 때문에 중간고사 범위가 6단원 하나인 경우도 많습니다. 앞선 물리전자공학에서 나온 단원들 보다 많은 식들이 나오기 때문에 시험에서 컨닝페이퍼 같은 것이 허용되지 않는다면, 어쩔 수 없이 공식을 외워주셔야 합니다. 저는 '시험볼 때는 결국 손으로 쓸 수 있어야 한다' 고 생각하기 때문에 직접 쓰면서 외우는 스타일입니다. 양이 많지만, 공부 방법은 매우 단순한 단원이라고 생각합니다. 철저히 문제풀이 위주(예제, 과제, 연습문제)로 공부를 하면서 사용되는 식들만 암기를 해주시

면 됩니다. 6.5절 이후에 나오는 side effect에 관한 부분은 수식에 관련된 문제를 내기 어려우므로 수업을 들으면서 교수님이 강조하시는 부분에 맞춰 공부하시면 됩니다.

7단원: 공부 방법은 6단원과 상당히 유사하나, 6단원보다 식이 좀 더 지저분합니다. 제 경험상 7단원의 경우 식을 유도하기가 어렵지 않고, 한 번 유도하고 나면 식을 외울 때 수월하므로, 꼭 공식 유도를 해보시는 걸 추천합니다. 억지로 외우는 것보다 식을 직접 유도하면서 외우는 게 쉬운 단원입니다. 정량적인 부분뿐만 아니라 7.6절부터 나오는 부가적인 효과들에 대한 것들도 시험 문제에 나왔던 만큼 시험에 안 나오겠지 하고 넘어가시면 안 되는 부분입니다. 팁을 드리면, 7단원의 앞에 나온 식들은 7.7절에 검멜폰 모델을 적분하면 얻을 수 있는 식이므로 검멜폰 모델 식을 사용할 줄 아시면 앞에 나온 식들 중 상당량을 외우지 않으셔도 됩니다.

※공식 암기와 문제풀이를 할 때의 팁

위의 두 과목의 경우 책에 나오는 공식이 매우 많은데 비해, 실제 문제를 풀 때 사용되는 식은 그것의 절반도 안 되므로 필요한 공식을 외우는 팁을 드리자면, 우선 처음에 책을 읽으면서 문제를 풀 때 필요할 것 같은 공식들을 단원별로 구분하여 A4용지에 적어놓고, 과제 문제와 연습문제를 풀면서 실제 사용된 식들을 표시하여 나중에 시험기간이 다가왔을 때 실제 사용된 공식들만 따로 A4용지에 단원별로 구분해서 적어놓고, 집중적으로 암기를 해주는 식으로 공식을 외우시면 시간 낭비를 하지 않고 효율적으로 외우실 수 있습니다. 공식들을 미리 많이 외워봤자 일주일도 지나지 않아 잊어버리므로 평소에는 공식을 적어둔 A4용지를 보면서 문제를 푸시면서, 공식의 사용법을 익혀두시기만 하면 됩니다. 첨부자료로 시험 직전에 제가 적은 7단원 공식을 적어놓은 A4용지를 예시로 보였습니다.

○ 학습방법을 통한 능력향상 정도 또는 기타 영향

위의 노하우에서 과목 전반적인 학습법을 통해, 난이도가 높은 전공 과목들에 대한 효과적인 공부 방법과 태도 등을 기술하여, 같은 시간을 공부하고, 책상에 앉아 있더라도 전공 과목에 대한 좀 더 깊은 이해도를 가질 수 있도록 하였습니다. 또한 단원별 학습법에서 물리전자공학과 반도체소자 과목에서 각 단원별로 교수님들이 중요하게 여기시고, 시험에 나올만한 부분들을 어떻게 공부를 해야하는지를 기술하여, 같은 시간을 공부하여도 좀 더 효율적으로 높은 성적을 성취할 수 있게 구성하였습니다.

○ 추천 이유 및 소감 등

저의 학습법을 추천 드리는 이유는 우선 저는 위의 학습법대로 공부를 하여 많은 시간을 투자하지 않고도 물리전자공학과 반도체소자 두 과목 다 3등 안의 성적으로 A+를 받은 경험이 있기 때문입니다. 공부에 많은 시간을 투자하는데도 불구하고 성적이 잘 안 나오는 학우분들이 계시다면, 위의 전반적인 학습법부터 읽어보시면 좋을 것 같습니다. 저는 양이 매우 많은 과목을 제외한 거의 모든 전공 과목에 위의 학습법을 적용하여 공부에만 시간을 쏟지 않고 동아리 활동과 근로 활동, 사교 활동 등 다른 곳에도 충분한 시간을 투자하면서 항공전자정보공학부 4학년 중에서 1등의 성적을 유지하고 있습니다. 또한, 위의 학습법은 저의 개인 경험만

을 바탕으로 작성한 것이 아니라, 주위의 공부량에 비해 성적이 안 나오는 학생들, 책상에 오래 앉아 있는데 학업성취도가 낮거나 성적이 안 나오는 학생들을 관찰하고, 직접 멘토링 해준 경험을 토대로 작성하였기 때문에 많은 학우들이 위의 학습법을 보고 조금 더 원하는 결과에 가까워질 거라 확신합니다. 사실, 예전에 학원 선생님이 하신 “지식은 나눈다고 닳지 않는다”는 말씀이 감명 깊게 남아 동아리 후배들과 학교 몇몇 동기들에게 학습 멘토링을 진행을 하고 있었고, 언젠가 한 번 정리를 해보는 것이 좋겠다고 생각하고 있었는데, 이번 나만의 학습노하우 에세이 공모전을 통해 후배들에게 알려줄 학습법을 정리할 기회를 얻을 수 있어서 좋았습니다.

[첨부] 7단원 주요 공식

$$i_c = I_{cp}$$

$$r = \frac{i_c}{i_{cs}}$$

$$\frac{i_c}{i_c} = \beta = \alpha$$

$$\frac{i_c}{i_c} = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta = \frac{\beta}{\alpha}$$

$$\Delta p_E = P_n (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1)$$

$$\Delta p_c = P_n (e^{\frac{qV_c}{kT}} - 1)$$

$$\frac{d\Delta p_E}{dx} = P_n \frac{qV_E}{kT^2} = \frac{\beta}{L_p}$$

$$\frac{d\Delta p_c}{dx} = \frac{\beta}{L_p}$$

$$I_{cp} = qA \frac{D_p}{L_p} (\Delta p_E \cosh \frac{W_b}{L_p} - \Delta p_c \cosh \frac{W_b}{L_p})$$

$$I_c = qA \frac{D_p}{L_p} (\Delta p_E \cosh \frac{W_b}{L_p} - \Delta p_c \cosh \frac{W_b}{L_p})$$

$$I_p = qA \frac{D_p}{L_p} [(\Delta p_E + \Delta p_c) \cosh \frac{W_b}{L_p} - \cosh \frac{W_b}{L_p}]$$

$$= qA \frac{D_p}{L_p} [(\Delta p_E + \Delta p_c) \tanh \frac{W_b}{2L_p}]$$

Active Mode; $V = 1$,
 $\omega_c \rightarrow \omega_n \approx 0$ 이면,
 $I_{cp} = qA \frac{D_p}{L_p} \Delta p_E \cosh \frac{W_b}{L_p}$
 $I_c = qA \frac{D_p}{L_p} \Delta p_c \cosh \frac{W_b}{L_p}$
 $I_p = qA \frac{D_p}{L_p} \Delta p_E \tanh \frac{W_b}{2L_p}$
 $= qA \frac{D_p}{L_p} \Delta p_E \frac{W_b}{2L_p}$
 $= \frac{qA \Delta p_E W_b}{2L_p}$

$$\text{sech } y = 1 - \frac{y^2}{3}$$

$$\text{cosh } y = \frac{1}{y} + \frac{y}{3}$$

$$\text{sch } y = \frac{1}{y} - \frac{y}{3}$$

$$\tanh y = y$$

$$r = \left[1 + \frac{L_p^2 n_i n_p}{L_n^2 p_i p_n} \tanh^2 \frac{W_b}{L_p} \right]^{-1}$$

$$= \left[1 + \frac{W_b n_i n_p}{L_n^2 p_i p_n} \right]^{-1}$$

$$\beta = \text{sech} \frac{W_b}{L_p}$$

$$I_{EN} = I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1), \Delta p_c = 0$$

Ics: 전압이 양수일 때 인접 주입전류

$$I_{ES} = -I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1), \Delta p_n = 0$$

$$I_{EN} = \alpha_1 I_{ES} = \alpha_1 I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1)$$

$$I_{ES} = \alpha_2 I_{EN} = \alpha_2 I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1)$$

$$I_c = I_{EN} + I_{ES} = I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1) - \alpha_2 I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1)$$

$$I_c = I_{EN} + I_{ES} = \alpha_1 I_{ES} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1) - I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1)$$

위에서 (4)와 (5) 식을 대입

$$\alpha_1 I_{ES} = \alpha_2 I_{ES}$$

$$I_c = \alpha_2 I_c + (1 - \alpha_1 \alpha_2) I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1) = \alpha_2 I_c + I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1)$$

$$I_c = \alpha_1 I_c - (1 - \alpha_1 \alpha_2) I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1) = \alpha_1 I_c - I_{cs} (e^{\frac{qV_E}{kT}} - 1)$$

따라서

$$\frac{\Delta p_c}{P_n} = \frac{\Delta p_E}{P_n} = -\beta_n \pm \text{바른쪽 항의 부호에 따라}$$

$$i_c = -I_{cs} + \alpha_2 I_{cs} = -(1 - \alpha_2) I_{cs}$$

$$i_c = -\alpha_1 I_{cs} + I_{cs} = (1 - \alpha_1) I_{cs}$$

$$i_n = i_c - i_c = -(1 - \alpha_1) I_{cs} - (1 - \alpha_2) I_{cs}$$

$$E(x) = -\frac{qV}{q} \cdot \frac{1}{N(x)} = -\frac{dN(x)}{dx}$$

$$N(x) = N(0) e^{-\frac{qx}{N_0}}$$

$$E(x) = \frac{kT}{q} \cdot \frac{q}{W_b}$$

포화전압이 아니라 전압이 주어질 때

$$I_{cs} = qA D_n N(x) E(x) + qA D_p \frac{dN(x)}{dx} = 0 \text{ (포화전압)}$$

$$I_c = (\alpha_1 I_{cs} + I_{cs}) N = (1 - \alpha_2) I_{cs} \frac{1}{1 - (1 - \alpha_2) \frac{qV_E}{kT}}$$

바른쪽 항의 부호에 따라

$$I_c = \frac{M I_{cs}}{1 - M \alpha_2}$$

이것이 정답

$$I_{cp} = \frac{-qAD_p n_i^2 (e^{\frac{qV_E}{kT}} - e^{\frac{qV_c}{kT}})}{\int_0^{W_b} n dx_n}$$

$$I_{cp} = \frac{qAD_p n_i^2 e^{\frac{qV_E}{kT}}}{Q_p}$$

여기서 n은

$$I_{cn} = \frac{qAD_n n_i^2 e^{\frac{qV_E}{kT}}}{Q_E}$$

여기서 n은

$$i_c = I_{cp} + \frac{qV_E}{kT} V_{cb} + \frac{2}{3} I_{cp} \frac{q}{kT} \frac{dV_{cb}}{dx}$$

$$I_{cp} = \frac{qV_E}{kT} I_{cp} \quad C_{cb} = \frac{2}{3} \frac{q}{kT} I_{cp} \tau_p = \frac{2}{3} Q_{cb} \tau_p$$

$$i_c = \frac{Q_{cb} I_{cp}}{I_c} = I_{cp} \beta \left(1 + \frac{qV_{cb}}{kT} \right) = I_c + I_{cp} \beta \frac{q}{kT} V_{cb}$$

이것이 정답

$$T_T = \frac{W_b^2}{2D_n} \quad (2\pi\tau_n)^{-1}$$

$$I_n = \frac{3}{4} \frac{P_T I_{cp}}{V_{cb}} = \frac{3Q_{cb} I_{cp}}{4V_{cb}}$$