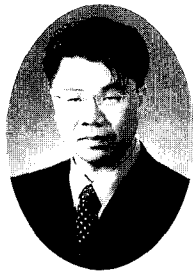
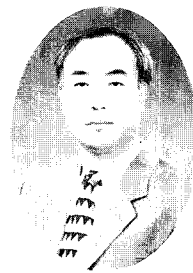


인텔리전트 파워 IC 기술의 동향



강 이 구
(안양대 전기전자공학과 겸임교수)



성 만 영
(고려대 전기공학과 교수)

1. 서론

21세기는 IT(Information Technology)와 환경의 시대로 막을 올렸다. 물론 이들의 기술을 지탱하는 것이 Si를 중심으로 한 반도체 기술임은 두말할 필요도 없으나, 파워 반도체 소자도 이들 산업의 견인차로서 큰 몫을 차지하고 있다. 1957년에 사이리스터가 발표된 이래 파워 반도체 소자의 발전과 더불어 이것을 사용하여 전력변환·제어와 이를 응용한 인텔리전트 파워 IC 산업도 현저한 발전을 이루어 왔다.

최근 전기전자 산업중 가장 주목받는 분야의 하나로 부상하고 있는 고전압 대용량 파워 일렉트로닉스 산업에 있어서 전력 변환 장치 및 제어 장치의 핵심부품으로 활용되고 있는 전력용 반도체 소자는 전력용 바이폴라 트랜지스터의 개발과 더불어 급진적인 발전의 계기를 맞이하였으며, 그 후 파워 MOSFET, IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), MCT(MOS Controlled Thyristor), SIT(Static Induction Thyristor) 등이 개발되어 기존에 있던 사이리스터, GTO(Gate Turn Off)등과 함께 널리 사용되고 있는 중이다.

이러한 파워 반도체 소자가 활약하는 인텔리전트 파워 IC의

분야에서는 “인버터화”를 키워드로서 최근 현저한 발전을 이루었다. 인버터는 최근 냉장고, 세탁기, 청소기 등 가정에서 다시 응용분야를 확대함과 동시에 컴퓨터의 무정전 전원, 엘리베이터, 범용 인버터, 로봇 등의 공장설비, 전기자동차, 지하철, 태양광 발전, 풍력 발전 등 가전, 정보, 산업, 교통, 전력의 각 분야에서 확실하게 응용분야를 확대하고 있다.

특히, 이러한 산업의 중심이 되는 파워 반도체 소자는 산업 시스템의 신뢰성을 높이고 다기능화 하면서 대용량화 및 고내압화를 실현시키기 위한 핵심부품으로 기존의 가전 및 산업용 뿐만 아니라 교통분야에서 고속전철, 전기자동차, 전력분야의 FACTS(Flexible AC Transmission System, 가변성 교류 송전), HVDC(High Voltage DC, 초고압 직류) 송전 및 미사일 관련 장비 계통의 시스템화와 군사정보 시스템인 Micro-Airplane의 설계 제작 등에도 크게 이용될 것으로 기대되고 있다. 아울러 환경규제의 해결방안으로 자동차 회사의 전기자동차 판매량은 차량 총 판매량의 기준으로 2005년경에는 10%로 의무화하는 법안을 마련되고 있는 실정에 비추어 볼 때 국내외의 기술 수요는 급신장 할 것으로 판단된다. 또한 발전분야에서는 증가되는 전기 에너지의 수요를 발전소 건설로

충당하기 위해서는 막대한 비용이 소요되고, 환경을 고려한 적절한 입지선정에 어려움이 있으므로, 새로운 발전소 건설보다는 대용량 인텔리전트 파워 IC를 이용한 전력계통의 효율적인 운용기술을 적용하는 것이 세계적인 추세이다. 또한 파워 소자에 구동·보호·진단회로 등을 모듈화한 IPM (Intelligent Power Module)이 그 편리성과 소형화를 특징으로 인텔리전트 파워 IC의 주역의 자리에 정착하였으며, 가전·산업·자동차·전철의 각 분야에서는 시장요구에 최적 설계된 IPM이 개발되게 되어 보다 큰 시장확대가 기대되고 있다. 이와는 별도로 종래의 Si를 대신하는 반도체 재료로서 SiC, GaN등을 이용한 화합물 반도체에 대한 기대가 점점 커지고 있는 실정이며, 21세기에 들어 지구환경보호에 파워 일렉트로닉스가 더욱더 중요한 역할을 할 것은 앞서 설명한 바와 같으며, 파워 반도체 소자는 이것을 리드함으로써 대전력화·고속화·저손실화·시스템화가 한층 더 진전되고 있다. 또한 시장요구의 다양화에 따라 응용제품에 최적한 성능, 시스템 및 패키지를 갖춘 파워 IC가 요구되게 되며, 이들의 요구에 응하기 위하여 파워 반도체 소자도 다양한 방면에서의 연구개발이 진전되고 있어 보다 더한 발전이 기대된다.

2. 인텔리전트 파워 IC용 파워 반도체 소자

그림 1은 동작주파수와 정격전력에 따른 파워소자를 구분한 그림이다. 여러 가지 파워 소자가 있지만 그들만의 정격과 동작주파수에 따라 사용하는 용도가 다를 수 있다. IGBT와 같은 경우에는 동작주파수 10kHz와 정격전력 10kVA~1MVA의 중간급에서 가장 많이 사용되고 있는데, 이와 같은 전력대와 동작주파수에서 사용되는 전력전자기가 가장 많은 것으로 알려져 있다. 그리고 대전력, 저주파수에서 가장 많이 애용되는 것은 사이리스터 계열인데, 이러한 사이리스터, GTO, GTC등은 전력분야의 변압기 및 발전기 부문

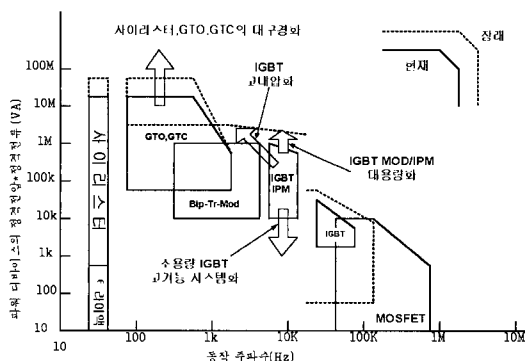


그림 1. 동작주파수와 정격전력에 따른 파워 소자들의 구분.

에서 가장 많이 사용되고 있는 중이다.

2.1 사이리스터

사이리스터는 턴-오프 기능은 가지지 않지만 고내압 대용량화에 적합한 디바이스이기 때문에 동작주파수가 낮은 전력용도에 많이 사용되고 있다. 전력 계통에 사용되는 대전력 변환기 등에서는 수십 MW에서 수백MW의 용량이 필요하며, 다수의 소자를 직병렬 접속하여 사용하기 때문에 소자 하나의 내압이나 전류용량을 가능하면 크게 할 것이 요망된다. 또, 고전압 회로에서는 게이트 회로의 절연이나 노이즈의 문제를 회피하기 위해 광신호로 트리거할 수 있는 광사이리스터가 주류가 되고 있다.

2.2 GTO

GTO 사이리스터는 고내압의 자기소호형 디바이스로서 파워 일렉트로닉스의 발전에 기여하여 왔다. 1980년대 초기의 2.5kV, 0.8kA 소자 이후 차츰 대용량화하여 최근에는 6kV, 6kA의 소자가 개발되었다. 주된 용도는 전기차량, 철강압연기, 기타 산업용의 비교적 대용량 인버터이다. 이들 인버터는 종래 수백Hz 정도에서 동작하고 있었으나 나아가 소형화, 저소음화하기 위해 동작주파수를 높이는 것이 요구되고 있으며 턴오프 타임의 단축, 스위칭 손실의 저감이 과제가 되고 있다. 또, 최근에는 전력계통에 있어서도 GTO를 이용한 자력식 변환기 등이 검토되고 있으며 장래적으로는 사이리스터와 마찬가지로 한층 더 고내압·대용량화가 요구되고 있다.

2.3 SI 트랜지스터/사이리스터

SI 디바이스는 접합 게이트에 인가하는 전압에 따라서 이미터 전류를 제어하는 전압제어형 디바이스이다. SI 트랜지스터는 다수캐리어 디바이스이며 스위칭이 빠른 것이 특징이고 수십 MHz의 고주파 발전기나 증폭기 등에 이용되고 있다. 한편, SI 사이리스터는 고내압화에 적합하며 GTO보다 고속이고 dV/dt, di/dt 내량이 우수하기 때문에 고내압·고속 스위칭 소자로서 인버터 등에 이용되고 있다. 최근의 개발 예로써는 4kV, 400A의 역도통 SI 사이리스터가 있으나 나아가 4.5kV, 1kA 소자의 개발도 진행되고 있다.

2.4 파워 MOS

전력용 MOS 전계효과 트랜지스터를 파워 MOS라 부른다. 파워 MOS는 전압제어형으로 사용하기 쉽고 스위칭이 빠르며 안전동작 영역이 넓은 등의 이점이 있는 외에 내압이 100V 정도 이하의 영역에서는 온 저항도 낮기 때문에 저전압 영역에서의 스위칭 전원이거나 인버터에 널리 이용되고 있다. 파워 MOS의 온 저항은 실용화된 이래 해를 거듭할수록 저감되어 최근에는 예를 들면 60V 소자에서는 초기의 값보다 1자리 낮

아졌다. 이것은 LSI 미세가공기술의 적용에 의한 부분이 크다. 나아가 최근에는 트랜치 구조의 채용에 의해서 한층 더 저항이 실현되고 있으며 60V 소자에서는 $1\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 이하의 소자도 나오고 있다. 그러나, 저전압 회로에서는 파워소자의 온저항에 의한 손실이 큰 부분을 차지하기 때문에 또 한 층의 저항이 요망되고 있다.

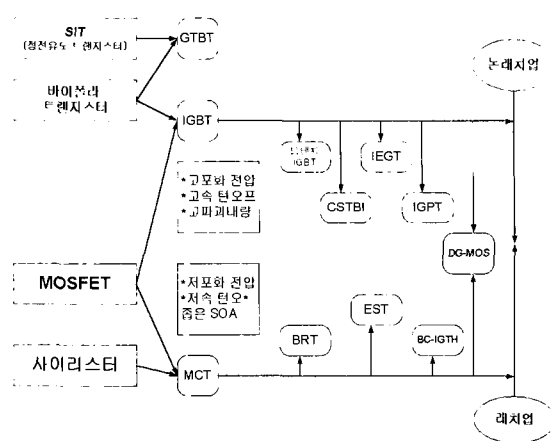
2.5 MOS 구동형 사이리스터

오늘날 괄목할 만한 수요 증가율을 보이고 있는 인버터 기기의 고주파화와 소형화의 추세에 의해 고속의 스위칭이 가능하고 구동회로의 전력손실을 감소시킬 수 있는 MOS 구동 소자가 주목받고 있다. MOS 구동 트랜지스터인 IGBT 소자에 대한 연구는 83년에 시작된 이래 놀랄만한 발전을 거듭하여 반도체 시장 점유율 33%의 최고의 성장률을 보이고 있다. 그러나 IGBT는 온-전압과 턴-오프 시간의 우수한 트레이드 오프에도 불구하고 고속 스위칭이나 고압용 설계시 전력손실이 증가하는 결과를 보인다. 이러한 이유로 인해 낮은 온상태 전압강하 특성을 지녀 저전력 손실이 구현 가능한 EST나 BRT와 같은 MOS 구동 사이리스터에 대한 분석 및 독자적 소자 구조에 대한 연구 결과가 90년대 들어 해외 선진 회사 및 유수의 대학에 의해 속속 보고되고 있어 2005년 실용화를 목표로 활발한 연구활동이 전개되고 있다. MOS 구동 사이리스터는 게이트에 양전압 혹은 음전압의 펄스 전압 제어 소자의 온, 오프가 가능한 사이리스터 구조로써, 1979년 MOS 구조를 이용하여 턴-오프가 가능한 소자가 제안된 이래, 1984년 GE사에 의해 EST나 BRT와 같은 MCT가 보고된 것을 기점으로 새로운 개념을 도입하거나, 공정 여건을 단순화하면서 사이리스터의 장점을 활용하고자 하는 다양한 연구가 시도되고 있다. 그림 2에 신규 파워 MOS 게이트 디바이스의 분류와 진전을 나타낸다. 이제까지는 사용의 편리성이나 성능이라는 양면에서 IGBT를 증가하는 소자는 나오지 않으나 IEGT, CSTBT 등 캐리어 분포제어에 의한 성능향상의 어프로치가 이루어지고 있다.

2.6 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)

인텔리전트 파워 IC에 있어서 이상적인 특성에 접근된 소자로 1993년에 개발된 IGBT는 높은 전류 밀도, 낮은 순방향 전압 강하의 우수한 순방향 전도 특성을 갖는 바이폴라 구조와 입력임피던스가 높고, 스위칭 특성이 탁월한 MOS 구조를 결합한 3단자 전력용 소자이다.

IGBT는 구조에 따라 VIGBT(Vertical IGBT), LIGBT(Lateral IGBT), TIGBT(Trench IGBT)로 분류되는데, VIGBT는 전력용 MOSFET과 동일한 공정에 의해 제조되며 높은 전류 용량을 얻을 수 있어 고내압, 대용량의 소자를 필요로 하는 응용 분야에서 개별소자로서 폭넓게 이용되고



GTBT : Grounded Trench MOS structure assisted Bipolar mode JFET

CSTBT : Carrier Stored Trench-Gate Bipolar Transistor

IEGT : Injection Enhanced IGBT

IGPT : Insulated Gate Pin Transistor

DG-MOS : Double Gate MOS

BC-IGTH : Base Coupled Insulated Gate Thyristor

EST : Emitter Switched Thyristor

BRT : Base Resistance Controlled Thyristor

MCT : MOS-Controlled Thyristor

그림 2. 신규 파워 디바이스의 MOS 게이트화의 진전.

있고, LIGBT는 활성화 영역이 감소하고 고내압화가 어려워 개별소자로서는 사용되지 않으나 평면상에 배치가 가능하고 격리가 용이하여 IPM이나 Smart Power IC와 같은 전력용 집적회로에 가장 적합한 소자로 주목받고 있다. TIGBT는 기존의 DMOS 게이트 구조를 트랜치 게이트 구조로 대체함으로써 JFET 저항과 축적층 저항이 제거되어 온 상태 전압강하를 감소시킬 수 있고, 단위 셀 피치가 줄어들게 되어 채널 밀도를 DMOS 구조에 비해 약 5배정도 증가시킬 수 있다. 또한 n^+ 에미터 주변을 지나는 정공 전류 경로가 개선되므로 래칭 전류 밀도도 증가하며, 또한 항복전압도 증가하게 되어 차세대 IGBT 소자의 대표적인 구조로 떠오르고 있으나 공정 상의 어려움이 단점으로 지적되고 있다.

2.7 SiC 파워 디바이스

SiC는 넓은 에너지 갭에 의해 $1,500^\circ\text{C}$ 이상의 높은 온도까지 반도체의 성질을 유지할 수 있고 작은 고온 접합 리크전류를 실현할 수 있다. 그 결과, 400°C 이상의 고온 동작이 가능하다. 또, 약 10배 정도의 고내압화와 100배 정도의 저손실화가 가능하다. 대략 근사를 이용하면 절연 파괴 전압 E_{max} 는 n^+ 드리프트 층의 캐리어 농도 n 제곱근에, 공핍층의 폭 l 은 n 의 제곱근 역수에 비례한다. SiC는 E_{max} 가 10배 높기 때문에 캐

리어 농도 n 이 10배, 즉 저항률 ρ 가 1/100이 되며 또 공핍층 폭은 1/10이 된다. n 층의 길이 w 는 대략 공핍층의 폭 정도로 설계하는 것이기 때문에 거의 1/10이다. 이 결과, 동일 칩 사이즈인 경우의 n 드리프트층의 저항 R 은 약 1/1,000이 된다. pn 접합부에서의 전압강하 등의 여러 가지 제약을 가미해도 고전류 밀도에서는 100배 정도의 저손실화를 기대할 수 있으며 손실을 같은 것으로 해도 좋은 경우에는 100배 정도의 대전류화를 기대할 수 있다. 또, 열전도율이 높기 때문에 디바이스내에서 발생한 열은 3배 정도 효율이 좋게 방열할 수 있기 때문에 한층 더 대전류화가 가능하다. 디바이스의 안전 동작 영역은 전압 정격 · 전류정격 · 전력정격 등으로 규정되지만 Si와 동일한 전류정격인 경우에 위에서 설명한 고내압화와 고온 동작을 기대할 수 있다는 점에서 30배 정도의 증대가 기대된다. 또, 위에서 설명한 것과 같이 동일 내압의 경우에 공핍층 폭이 약 1/10로 짧아지기 때문에 디바이스의 길이, 즉 캐리어의 주행길이를 짧게 할 수 있고 또한 포화속도도 크기 때문에 10배 정도의 고속화 · 고주파화가 가능하다.

MOSFET 등의 MOS계 디바이스의 속도는 게이트 저항이나 게이트 용량에 따라 규제되는 경우가 많지만 고전류 밀도로 가능하기 때문에 동일 전류에서는 칩 사이즈를 대폭적으로 저감할 수 있는 결과, 게이트 저항이나 게이트 용량이 저감되고 역시 10배 정도의 고속화를 기대할 수 있다.

3. 파워모듈 패키지의 동향

파워모듈이란 여러 개의 파워 반도체 칩을 용도와 목적에 따라 결선하고 하나의 패키지로 수납한 복합형 반도체를 말한다. 이 파워모듈도 IGBT나 IGBT칩을 이용한 IPM의 등장과 함께 그 패키지도 점차 진보하고 있다. 파워모듈의 패키지에 있어서 그 최대의 특징인 방열과 내부 절연을 유지하기 위한 절연기판 구조의 진전이 있었는데, 절연기판은 트랜지스터 모듈 개발초기는 알루미늄 세라믹(Al_2O_3) 절연기판을 채용하고 있었으나, 최근의 IGBT 모듈에서는 AlN이나 Al_2O_3 의 두꺼운 동박을 씌운 절연기판이 중용량 이상의 모듈에 채용되어 특성 향상이 도모되었다. 소용량 모듈의 경우에는 두꺼운 동박이 있는 수지절연기판이나 트랜스퍼 몰드성형 수지절연이 채용되고 있다. 저열저항 절연기판의 개발 · 개선이나 압접 기술의 도입 등에 의한 신뢰성 향상에의 기대가 높아지고 있다.

파워모듈의 패키지 기술은 단순히 칩을 물리적으로 보호하는 것만이 아니라 적극적으로 패키지 기술을 활용하여 칩의 성능향상에 기여한다고 하는 움직임이 있으며 성능개선, 코스트 저감, 사용의 편리성 추구 및 신뢰성 향상이라는 각 방면에서 IPM의 패키지 기술의 도전이 전개되고 있다. 성능 개선의 일례로써 대용량 파워 모듈에서는 IGBT의 고속 동작에 의한 서지 전압을 억제할 목적에서 내부 인덕턴스를 저감할 수 있

는 전극구조가 채용되게 되었다. 코스트 저감대책으로서는 중용량 이상인 IPM의 2층 구조를 IC의 강화나 부품수의 삭감에 의해서 1층화하는 방법이나 소용량의 분야에서는 파워칩(IGBT, 프리휠 다이오드)과 제어용 IC(HVIC, LVIC)를 동일 프레임상에 베어칩 상태로 탑재하고 리드 프레임과 히트싱크를 고열전도수지로 트랜스퍼 몰드한 DIP(Dual In line Package)형 IPM도 출현하여 가전 등의 응용에 전개가 기대되고 있다.

4. 파워 IC의 인텔리전트화

파워 디바이스의 인텔리전트화를 진행하는 상에서 중요한 기술의 하나에 제어용 IC의 설계기술이 있다. 현재의 IPM은, LVIC(저압 IC) 기술로 구동회로와 보호회로가 집적되어, 앞으로 점점 주변부품을 넣는 형태로의 집적화가 진행된다. 한편, 고전위 측(P측)의 IC는 현재로서는 같은 구조의 IC가 사용되고 있으며 절연은 포토 커플러나 펄스 트랜스를 필요로 한다. 최근, 실리콘 칩상에서 회로 절연을 하는 HVIC(고압 IC)가 개발되어 실용화되게 되었다. HVIC에는 종래의 기능에 추가하여 고전위 측의 신호전달을 위한 레벨 시프트 회로나 고전위 측의 전원을 확보하기 위한 부트 스트랩 회로 등이 집적된다. 또, HVIC의 절연을 실현하기 위한 분리기술로서는 접합분리와 유전체 분리기술이 있다. 모두 현재로서는 600V의 절연이 주류이지만 1200V에의 도전이 진행되고 있다.

21세기를 향한 차세대 IPM은 파워칩, 제어용 IC, 패키지의 각각의 기술이 시장 요구를 받아들여 보다 밀접하게 융합하고 파워칩은 보다 저손실이라는 방향으로 진행되며 시스템화에 관해서는 그림 5에 나타내듯이 토털 시스템의 효율화를 목적으로 한 시스템 인 모듈의 방향으로 진행될 것으로 생각된다. 그러므로 시스템 전체의 보호기능이나 제어기능이 더욱 요구되며 HVIC의 채용과 제어용 IC의 고집적화가 필수적인

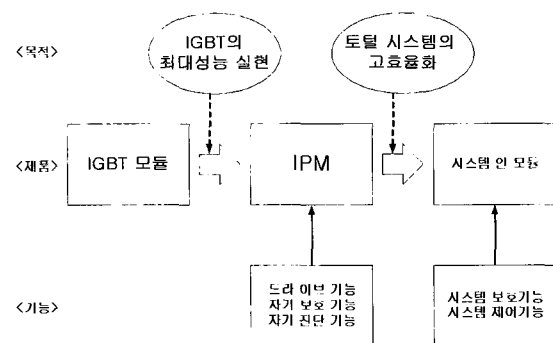


그림 5. 인텔리전트 파워 IC.

된다. 예를 들면 용도에 따라서 전력 아날로그 출력, 과전류 경보, 접합온도 출력, 과전압 보호, 라디오 노이즈 대책 등의 여러 가지 기능이나 제어전원 등을 포함한 IPM이 출현할 것으로 판단된다.

5. 파워 소자 및 인텔리전트 파워 IC의 금후의 전개 및 과제

파워 디바이스는 휴대전화, 비디오 및 오디오, 컴퓨터등의 소전력부터 철도나 전력송전등과 같은 대전력에 이르고 또한 직류부터 MHz급 고주파에 이르는 광범위한 전력의 변환제어에 있어서 그 장점을 살린 실용화가 더욱 확대되고 있다. 특히 파워 소자 기술에 LSI, VLSI, ULSI 기술을 끌어들이고 고효율 디바이스의 끊임없는 개발에 의한 디바이스·성능·품질향상이 도모되는 동시에 개별소자로부터 모듈, IPM, HVIC로 소자 자체의 시스템화도 더욱 진전해 나갈 것이다.

한편, 인텔리전트 파워 IC는 파워 반도체 소자를 사용한 스위칭에 의해 전력변환이나 제어를 하는 기술로서, 전력을 이용하는 모든 분야에서 널리 도입되고 있는 중이다. 이러한 인텔리전트 파워 IC 기술은 장래의 에너지 문제, 자연환경 문제 등의 해결을 위한 중요한 열쇠를 쥐고 있으며, 고도 정보화 사회를 뒷받침하는 중요 역할도 맡고 있다. 인텔리전트 파워 IC 기술의 발전을 위해서 파워 반도체 소자는 물론이고, 회로를 구성하는 자성재료, 유전재료, 도전재료, 그리고 고성능 2차 전지, 고효율 태양전지 등 종합적인 진보가 필요하며, 앞으로는 이상적인 변환장치를 향해서 연구가 진행되고 발전할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- (1) B. J. Baliga, "Power Semiconductor Devices", PWS Publishing Company, 1996.
- (2) W. Wondrak, "A new concept for high voltage SOI devices", Proceeding of ISPSD'92, p. 278, 1992.
- (3) E. J. Wildi, "New high voltage IC technology," IEDM Tech. Dig., p. 262, 1984.
- (4) F. Udrea, "Development of the next generation of insulated gate bipolar transistors based on trench technology," Proceeding of ESSDERC, p. 504, 1997.
- (5) H. Yamaguchi, H. Himi, S. Fujino, and T. Hattori, "Intelligent power IC with partial SOI structure", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34, No. 2B, p. 864, 1995.

저 자 약 력

성명 : 성만영

❖ 학 력

- 1975년 고려대 전기공학과 졸업
- 1981년 고려대 대학원 전기공학과 공학박사

❖ 경 력

- 1985년 - 1989년 Univ. of Illinois 부교수
- 1989년 - 현재 고려대 전기·전자·전파공학부 교수
- 현재 한국전기전자재료학회 부회장

성명 : 강이구

❖ 학 력

- 1993년 고려대 전기공학과 공학사
- 1995년 고려대 대학원 전기공학과 공학석사
- 1999년 고려대 대학원 전기공학과 공학박사

❖ 경 력

- 1999년 - 현재 안양대 전기전자공학과 겸임교수