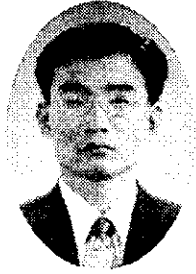


고속 전력변환용 반도체 Switching 소자(IGBT)의 기술 및 특허동향



김용주

(특허청 심사4국 반도체1과 심사관/공학박사)



정희환

(특허청 심사4국 반도체1과 심사관/공학박사)

1. 서론

최근 전력변환기술을 주제로 하는 파워엘렉트로닉스 (Power Electronics: PE)의 발전은 전력분야, 산업기기, 정보·통신 및 가정용기기에 이르기까지 인류생활 전 분야에 매우 폭넓게 이용되어지고 있다.

PE는 전력변환용 반도체소자의 발전에 크게 의존하는데 종래, 전력변환 제어용의 파워반도체 소자로서는 逆阻止 3단 자형과 역 도통형의 사이리스터가 널리 사용되어져 왔다.

그러나, 사이리스터는 자기소호가 불가능한 소자이기 때문에 轉流회로가 필요한 등의 적용범위가 제한적이었으나 1970년대에 들어서면서 자기소호가 가능한 소자인 GTO사 이리스터(Gate Turn-off Thyristor)와 Power MOS의 출현 및 Bipolar Transistor의 대용량화에 의해 전력변환장치의 응용범위가 급속히 확산되었다.

1980년대末 IGBT가 실용화되면서 MOS나 IGBT등의 전압제어형 소자의 출현은 제어회로의 IC화를 가능하게 하여

표 1. 자기소호형 파워반도체소자의 분류

	바이폴라	MOS	SI
트랜지스터	Bi-Transistor	MOSFET	SIT
싸이리스터	GTO Thyristor	IGBT·MCT	SI-Thyristor

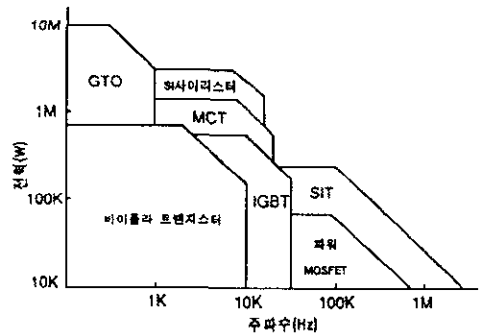


그림 1. 전력용 반도체소자의 적용 가능범위

PE의 발전에 크게 기여를 했을 뿐만이 아니라 전력변환용 반도체소자의 성능향상 및 특성개선에 새로운 전기를 마련했다고 볼 수 있다.

본 稿에서는 이러한 전력용 반도체 스위칭소자를 간단히 분류하고 상호 비교를 행함과 동시에 고속스위칭소자로서의 IGBT의 특성 개선, 최적화 및 트랜치구조의 채용등을 중심으로 앞으로의 기술동향 및 과제와 그에 따른 특허출원 동향에 대하여 소개하고자 한다.

2. 파워 스위칭소자의 특징 및 과제

표 2. 자기소호형 파워반도체소자의 분류

	구동전력 직렬접속	직렬 접속	병렬 접속	과전류 보호	과전압 보호	PWM 주파수
GTO Thyristor	대	○	○	△	○	3kHz
Bipolar Tr.	중	×	◎	○	○	10kHz
Bipolar Tr. Module	중	×	◎	○	○	10kHz
Power MOSFET	소	×	◎	◎	○	1M이하
Power MOS Module	소	×	◎	◎	○	100kHz
IGBT	소	×	◎	○	◎	100k이하
MCT	소	×	◎	○	×	20kHz
SI-Thyristor	소	○	○	△	○	10kHz
SIT	소	×	◎	○	○	100kHz

(×: 나쁨, △: 보통, ○: 양호, ◎: 매우양호)

자기소호형 파워 스위칭소자는 그 구조로부터 표 1과 같이 바이폴라系, MOS系, SI系와 트랜지스터群, 싸이리스터群 등으로 나눌 수 있다.

MOSFET·SIT등의 유니폴라소자는 스위칭속도가 빠르고, tail전류 또한 존재하지 않기 때문에 스위칭손실은 적지만 도통 손실이 큰 것을 단점으로 들 수 있다.

IGBT, MCT, B-SIT등의 바이폴라소자는 전압강하가 작고, 스위칭주파수가 20kHz 이상의 영역에서의 적용범위가 크게 확대되고 있다.

이중 가장 보급이 일반화되어 있는 것은 IGBT로서 현재 MOSFET 구동의 PNP transistor 동작을 원리로 하는 제3세대 IGBT는 낮은 구동전력과 on전압 및 중간 주파수(100kHz 전후)대에 대응 가능한 주파수특성을 가지고 있다.

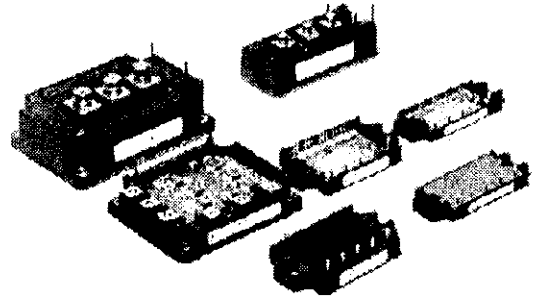


사진 1. IGBT-IPM

표 4. IPM의 보호기능

기능	내용
과전류 보호	콜렉터전류 감시 (과전류에 대해보호 동작으로 전류를 차단)
단락 보호	"
드라이브 전원전압 보호	드라이브 전원전압을 검출하여 전압이 저하하면 전압 부족으로 인한 소자의 파괴를 막는다
과열 보호	온도센서를 내장하고 온도가 이상상승하면 출력을 정지시킨다.

올드형 디스크리트IGBT, IGBT모듈 그리고 IPM (Intel-ligent Power Module)등이 제품화되어져 중·소용량은 물론 대용량의 응용에까지 그 영역을 넓혀가고 있다.

사진 1에 IGBT-IPM의 외형과 표 4에 그 보호기능을 나타내었다.

현재 토달시스템의 코스트다운 및 저손실, 소형화를 위한 ULSI process 기술의 적용과 새로운 개념의 소자로서, Trench Gate기술, Fine Pattern, MCT(MOS Controlled Thyristor)등의 새로운 개념의 소자들이 개발되었다.

MCT의 구동기술은 아직 충분히 확립되었다 할 수 없는 상태로 전압강하가 다른 소자에 비해 상당히 작기 때문에 대전

표 3. 전력변환용 파워 반도체소자의 특성 비교

	GTO Thyristor	SI Thyristor	Bipolar Transistor	Power MOSFET	IGBT	SIT	MCT
최대정격	6000V~5000A 4000A~4500A	2500V~600A 800A~1200A	1400V~400A 800A~600A	500V~1500A	1700V~300A 800A~600A	1500V~180A	1000V~100A
On저항	2.5V	2.5V	2.5V	6.5V	2.5V	30V	1.1V
Gate구동	전류	전압	전류	전압	전압	전압	전압
Turn-on시간	8.0μs	3.0μs	2.0μs	1.0μs	1.0μs	0.3μs	0.2μs
Turn-off시간	14μs	3.2μs	14μs	0.7μs	2.0μs	0.3μs	2.0μs
di/dt 내량	200A/μs	300A/μs	-	-	-	-	200A/μs
dv/dt 내량	600V/μs	200V/μs	-	-	-	-	20000V/μs

류용 용도에 상당히 유망한 것으로 평가받고 있다.

그림 1은 최신의 파워 반도체소자의 적용범위를 나타낸 것으로 각종 파워 반도체소자의 특징을 표 2에, 소자 각각의 특징을 비교한 것을 표 3에, 그리고 종합 평가를 행한 것을 표 5에 나타내었다.

2.1 Power-MOSFET

다수캐리어소자로서 1MHz이상의 고속동작이 가능하지만 이것을 인버터에 사용하는 경우 내부다이오드에 순환전류가 흐르므로 Pt 확산 등에 의해 다이오드의 역회복특성 개선이 필요하고, 문턱전압특성을 갖고 있지 않아 내압에 대해 2.6승에 비례하여 출력이 급상승하는 단점을 가지고 있다.

2.2 Cool MOS

기존의 MOSFET과 구조는 같지만 출력특성에 있어서 문턱전압이 없고 on저항이 낮아 고속동작이 필요한 소용량의 스위칭전원의 분야에 적합하다 할 수 있지만 고내압화에 따른 유효 면적화 및 내부다이오드의 역회복 특성개선에 근본적 해결이 선행되어야만 인버터에 사용 가능해진다.

2.3 IGBT

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)는 PN접합의 순방향 전압분의 게이트 문턱전압이 존재하며, 전도도 변조로서 저역에서 포화전압이 MOSFET보다 낮고 전압구동방식으로 축적시간이 없어서 부하전류 및 전압파형 제어가 가능하다.

또한 게이트구동 저항값의 선택에 의해 dv/dt, di/dt의 제어가 가능함과 동시에 스너버화가 가능한 등의 장점을 갖는 반면, 구조적으로 과포화동작 모드에 들어가지 않으므로 축적시간은 없지만 off시에 손실이 큰 단점을 가지고 있다.

2.4 BSIT

문턱전압값을 갖지 않는 소자로 on저항은 낮지만 홀의 확

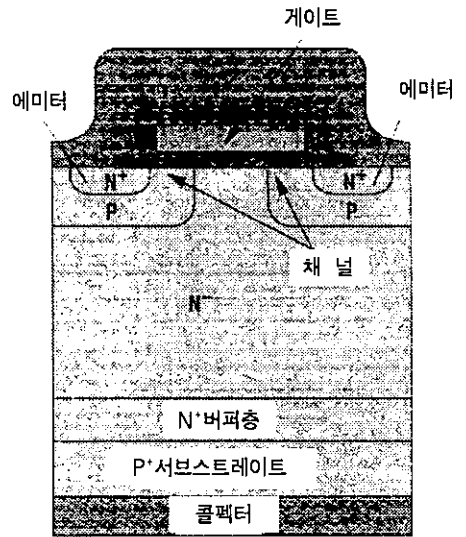


그림 2. IGBT Unit의 단면도

산이 제한되어 고내압화에 한계가 있다.

On상태를 유지하기 위해 항상 게이트전류를 필요로 하며, 스위치의 Turn-off시에 소수캐리어를 제거하기 위해 부하전원이 필요하며, 게이트전류는 통상 과포화상태에서 동작하므로 스위치의 Turn-off시에 캐리어 축적시간의 존재로 인하여 MOS계 소자와 같이 고속동작용이 아닌 중저속용으로 적합하다. 따라서 인버터 등의 스위칭전원에 사용할 경우 데드타임의 제어 및 스버너회로가 필요하다.

3. IGBT의 기본특성

IGBT는 Power MOS의 고속성과 바이폴라계의 저저항성을 양립시킨 고내압·대전류용 소자로서, MOS구조를 갖는 바이폴라소자이다.

그림 2는 IGBT의 유닛 단면도로 그 구조는 MOSFET과

표 5. 전력변환용 파워 반도체소자의 종합평가 (각 항목별 5점 만점 기준)

	GTO	Bipolar-Transistor	Power-MOSFET	IGBT	MCT	SI-Thyrasto	SIT
내압	5	4	2	4	4	4	3
dt/dv 내량	2	3	4	4	5	4	4
전류내량	5	4	1	4	5	4	2
도통시 포화전압	5	4	1	3	5	4	1
입력 임피던스	1	1	5	5	5	3	4
Turn-off에 필요한 에너지	1	2	5	5	5	2	4
허용 주파수	1	2	5	4	3	3	5
cost	1	5	4	4	2	2	4
공급상황	3	5	4	4	3	2	2
Total	24	30	31	31	37	28	29

유사하나 소수캐리어주입을 재촉하는 P*가 추가된 P*-N*-N의 3층 구조가 채용된 점이 다르다.

기본동작은 베이스에 의해 소수캐리어인 홀을 에미터 및 컬렉터에 주입되고 고저항인 컬렉터 층으로의 소수캐리어 주입은 전도도 변조를 발생시켜 낮은 컬렉터-에미터간 포화전압 $V_{CE(SAT)}$ 를 낮은 레벨로 유지하며, 게이트에 인가하는 전압으로 구동하기 위해 입력 임피던스를 높여 구동전력을 낮게 하는 특징을 가지고 있다. 또한 고속 스위칭 특성과 저포화 전압특성은 기판(P*) 영역으로부터 주입되는 홀에 의해 좌우된다.

이처럼 저포화전압의 유지에는 홀의 주입량을 늘려 라이프 타임을 길게 유지할 필요가 있지만, 고속의 스위칭을 위해서는 이와 정반대로 N*층의 농도 및 두께를 최적으로 설계해야만 한다.

4. IGBT의 세대별 분류

IGBT는 1980년대 중에 모습을 나타내었으나 원천적으로 $V_{CE(SAT)}$ - t_r 트레이드 오프 특성개선에 의해 유닛셀의 축소율이 제2세대에서 1.0($V_{CE(SAT)}=3.0V$)에서 제4세대인 트랜치 구조($V_{CE(SAT)}=1.6V$)에서 0.06으로 크게 작아지고 있다.

제2세대의 전반기에서는 IGBT의 패턴 최적화를 위하여, 그리고 제2세대 후반기에서는 기생소자의 동작을 억제하고, 제3세대에서는 미세화기술을 도입하여 트레이드 오프특성 ($V_{CE(SAT)}$ - t_r)을 개선하여 왔다.

종래 IGBT의 라이프 타임 제어에 전자선 또는 Pt가 상용되어 그림 3(a)와 같이 IGBT의 채널영역, N 및 P*영역의 전면에 조사되어 격자결함이 발생되어 균일한 라이프 타임을 제어하기 곤란하였으나 그림 3(b)와 같이 전자에 비해 질량이 커서 조사되는 가속전압을 제어하여 IGBT의 정해진 위치에서 캐리어의 수명을 결정하는 트랩준위를 용이하게 형성하는 방법으로 격자결함을 줄여 캐리어수명의 고정도 제어가 가능해진다.

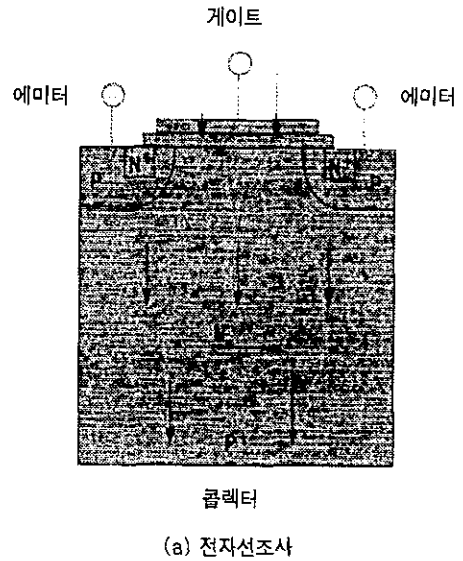
제4세대 IGBT에서는 게이트부에 트랜치구조를 채용하여 채널저항을 저감하여 $V_{CE(SAT)}$ 를 개선하여 제3세대 소자에 비해 스위칭손실비가 20%정도 개선되었다.

5. IGBT의 특성과 구조

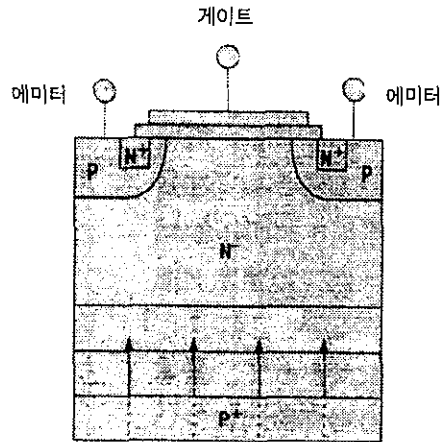
5.1 낮은 on전압

IGBT의 성능향상을 위하여

- on전압의 저감을 위하여 미세패턴화 가공기술 및 트랜치 게이트화,
- 고속 스위칭특성 향상을 위하여 낮은 게이트용량, 재결



(a) 전자선조사



(b) 프로톤 조사

그림 3. 라이프 타임 제어

- 합 중심의 제어 및 PT구조에서의 N-층 농도의 저감화,
- 내압향상을 위한 NPT(Non Punch Through)화 및 보호기능의 부가,
- EMC대응을 위한 귀환용량의 저감화 등의 문제가 해결되어져야 하며, 기판에서는 P*-N*-N의 3층의 PT구조가 일반적으로 고속동작이 가능한 반면 $V_{CE(SAT)}$ 가 커지는 단점을 갖는다.

이러한 문제를 해결하기 위해 도4와 같이NPT구조를 채용함과 동시에 컬렉터로부터의 소수캐리어의 주입을 최적화함으로써 Turn-off시간의 고속화를 가능하며, $V_{CE(SAT)}$ 가 낮고, 높은 내량을 갖는다.

5.2 고속화 기술

IGBT에 있어서 고내압화를 위해 온저항의 저감 및 고속 스위칭 특성개선을 위하여 NPT기술이 크게 주목을 받고 있다.

PT타입에서는 N'영역의 공핍층 영역의 전계 강도가 N'영역의 농도분포에 따라 N'영역까지 직선적으로 저하하고, N'영역에서는 농도가 높으므로 빠르게 전계강도가 제로에 달한다.

그러나 NPT에서는 N'영역이 존재하지 않으므로 N'영역에서 내압을 갖게하기 위하여 전계가 제로로 될 때까지 공핍층을 늘릴필요가 있으며, N'영역의 거리를 충분히 확보해야 한다.

이상의 IGBT의 특성개선에 있어서 필요기술을 아래와 같이 요약해 볼 수 있다.

- ▲ 트랜지기술 채용에 의한 낮은 $V_{CE(SAT)}$ 화
- ▲ 최적 패턴화에 의한 고내량 확보
- ▲ 注入量 최적화에 의한 고속 스위칭기술의 실현
- ▲ NPT구조에 의한 낮은 $V_{CE(SAT)}$ 와 고속 스위칭의 실현

5.3 파워소자의 기술

전력변환용 파워소자는 소자자체의 도통손실을 최소로 억제하는 방향으로 발전되고 있으며, 스위칭소자로서 특히 고속용IGBT 개발에 주목하고 있다.

파워소자는 on전압의 저감, 스위칭시간의 트레이드 오프 특성의 개선, 열저항의 저감, 노이즈문제 개선 및 전력제어에 역점을 두고 다양한 새로운 구조가 제안되고 있으나 이러한 소자는 어디까지나 MOSFET처럼 전압구동을 기본으로 하고 있다.

특히 반도체 웨이퍼를 소재로서 실리콘을 사용하는 한 특성개선에 한계가 있음을 인지하고 신소재로서 탄화실리콘(SiC)이 특히 파워소자의 분야에 있어서 실현 가능한 소재로 크게 부상하고 있다.

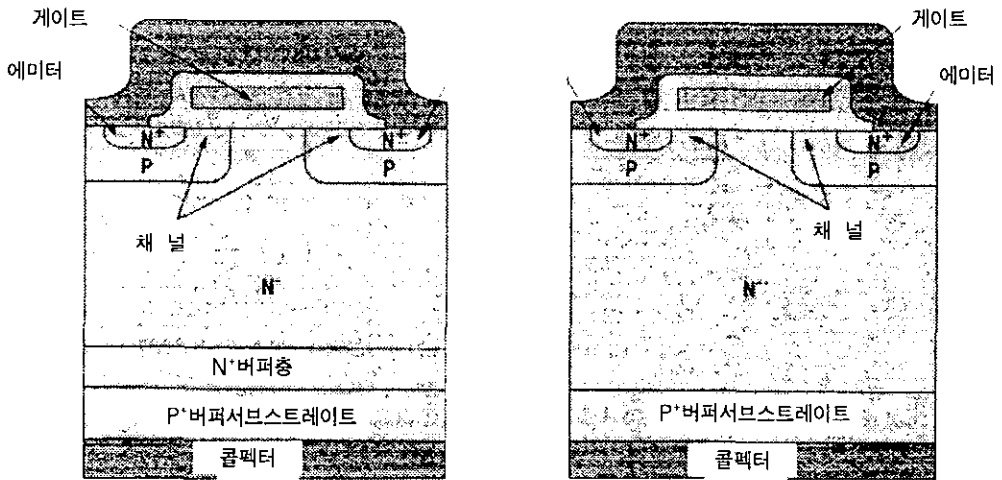
6. 앞으로의 시장전망 및 특허출원 동향

1999년은 3년간의 반도체산업 불황이 역전되어 호황으로 반전되는 해로서, 급변하는 첨단 기술의 도입으로 인한 전자 기기 생산과 더불어 아시아·태평양 인접국가들의 통화위기에 있어서의 회복 등이 전반적인 반도체수급 및 가격안정화에 기여할 것으로 보여 아래의 그림 5에 나타낸 바와 같이 2003년까지 약 5년간 평균 12%의 성장율을 기록할 것으로 기대된다.

주요반도체 응용분야에 있어서 최대 소비분야인 컴퓨터는 인터넷이란 호재에 의해 보급이 확대되고 있으며, 전자상거래의 이용확대는 서버의 수요에 공헌하고 있으며, DVD ROM 및 액정 모니터는 제어용 소자를 특히, 칩 카드는 전년대비 37%의 성장율을 보이고 있다.

특히, 컴퓨터의 보급과 디지털 TV방송의 개시로 인하여 민생기기의 디지털화는 시스템 LSI분야에 있어서 세계의 반도체 메이커들이 첨단 기술개발에 힘쓰는 한편 IP (Intellectual Property)의 확보가 이 분야에서의 승패를 좌우할 것으로 보고 지적재산권 확보에 노력을 기울이고 있다.

현재 우리나라에 출원되고 있는 반도체 관련기술에 관한 특허 및 실용신안은 그림 6에 나타낸 바와 같이 크게 두가지로 나누어 볼 수 있다.



(a) PT type의 IGBT(Punch Through)

(b) NPT type의 IGBT(Non Punch Through)

그림 4. PT type과 NPTtype IGBT의 구조비교

참고 문헌

- [1] 金龍柱, "高周波共振形電力變換制御裝置と特性評價に関する研究" KOBE大學博士論文, 1996.
- [2] 岡村 昌弘, "最近のパワーデバイスの動向", 電氣學會誌, Vol. 118, 1998.
- [3] S. Eicher, etc, "Punch through type GTO with Buffer Layer and Homogenous Low Efficiency Anode Structure", Proc. ISPSD' 96, 261, 1996.
- [4] 電子技術, 日刊工業新聞社, Vol. 39, No. 10, 1997.
- [5] 金谷正敏, 他, "ワイドギャップ・半導體シリコンカーバイトのバルク單結晶成長", 應用物理 Vol. 64, 1995.
- [6] B. J. Baliga, "Trends in Power Semiconductor Devices", IEEE Trans. ED 43, 1996.
- [7] 菅原久男, "IGBTの特性改善と新素子構想, 「A-2新しい半導體スイッチ素子」, 95スイッチング電源システムシンポジウム.
- [8] 電子技術, 日刊工業新聞社, Vol. 42, No. 4, 2000.

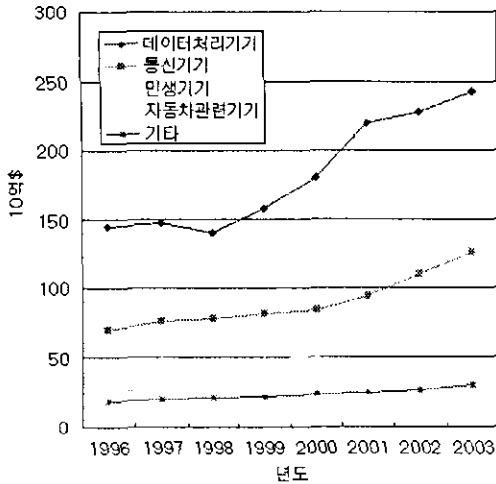


그림 5. 응용분야별 세계반도체 소비예측

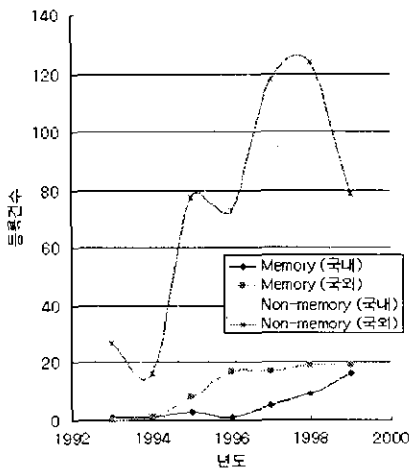


그림 6. Memory 및 Non-Memory 배치설계 등록현황(한국 특허청)

메모리관련 기술은 회로설계 및 제조공정기술에 관한 것으로 이 분야에 있어서는 이미 세계적인 수준에 도달하였으며, 특허출원은 1998년을 정점으로 점차 줄어들고 있는 추세이나, 이와 반대로 비메모리분야는 그 수요의 증가에 힘입어 기술개발이 활발히 진행되어 점진적으로 특허출원이 증가하고 있다.

특히 우리나라에서는 확보된 메모리설계기술을 바탕으로 미·일등의 선진국에 비해 10여년 이상 뒤진 비메모리 설계 기술을 단시간내에 습득하기 위하여 업계 및 관련기관들이 최선을 다하고는 있으나, 아직은 초보단계를 면하지 못하고 있다.

저 자 약 력

성명 : 김 용 주

❖ 학 력

(日)고베대학 공학박사(전력전자공학)

❖ 경 력

동력자원 연구소 위촉연구원. (日)세타기공 위촉연구원. (日) 전자통신학회 학술조사위원 역임. 삼성전관 생산기술센터 선임연구원. 현재, 특허청 심사4국 반도체1과 심사관. 호서대학 겸임교수.

✉ E-mail: kobeman@unitel.co.kr

성명 : 장 회 환

❖ 학 력

경희대학교 공학박사(전자공학)

❖ 경 력

ETRI 반도체 연구단 연구원. 현재, 특허청 심사4국 반도체1과 심사. 목원대학 겸임교수.

✉ E-mail: hwanchung@yahoo.com