

半導體 素材의 物性分析 技術 開發 動向

白文哲, 趙庚翼, 李仲煥, 權五準

韓國電子通信研究所 半導體研究團 物性分析研究室

I. 序 言

마법의 돌, 또는 첨단과학 시대의 핵심주자로서 평가받는 半導體 산업은 그 중요성 만큼이나 빠른 속도로 발전을 거듭하고 있으며 하루가 다르게 새로운 技術 및 素材가 개발되고 있다. 실리콘 기억소자의 경우 M-bit 급 집적도에서는 이미 submicron 시대를 지나 그 이하 nanometer 단위의 선폭을 가공하고 제어해야 하는 수준에 이르고 있다. 이러한 기술은 이미 기계를 이용한 單純加工의 개념에서 탈피하여 材料의 物理化學的 특성의 限界에 도전하는 필요성에 직면한 것으로 평가되고 있다. 이에 따라 半導體 素子の 製造工程에 있어서 素材에 대한 評價 및 分析 技術의 개념도 종래의 素子開發을 위한 補助的인 역할로부터 불량원인의 분석은 물론 新技術 및 新素材 開發을 위한 필수불가결한 핵심기술로서의 역할을 담당하는 3점에 있는 것이다. 이와 같은 추세에 배경에는 素材의 表面 및 구조를 精密分析하고 관찰할 수 있는 分析器機의 혁신적인 開發과 分析技術 및 데이터 處理技術의 놀라운 발전이 있음을 들 수 있다.

이미 美國이나 日本 등의 선진국에서는 半導體 産業의 初期 단계에서부터 이러한 分析技術의 研究開發에 착수하여 자체적인 技術開發의 능력 및 新技術의 創造能力을 확보하고 있다. 실제로 해외에 있는 表面分析 전문기관의 경우, 각 기관마다 처리하는 물량의 90% 이상이 半導體 素材이고 대부분의 큰 半導體 會社에서는 자체적으로 素材分析센터(materials research laborator)를 설립하여 운영하고 있으며 상당 부분의 know-how가 이 분석센터로부터 도출되고 있다고 한다. 이에 반하여 國內의 경우 最近까지도 半導體 技術이 模倣의 단계에 있었으므로 이와 같은

投資가 미흡했고, 分析技術은 기초적인 기술분야로서 그 투자효과가 단 시일내에 可視的으로 나타나지 않는 분야이기 때문에 더욱 외면당해온 것이 사실이다. 그러나 16/64M 및 giga-bit 급의 VLSI/ULSI 시대를 맞이하여 이러한 技術은 보조기술로서가 아니라 주도적인 기술로서 확보되어야 하며 다행히 이러한 인식이 점차 파급되어 현 시점에서 점차 投資規模가 확대되고 있다.

여기에서는 半導體 素材의 평가를 위한 주요 분석 기술의 간단한 원리 등을 소개하고, VLSI/ULSI 급의 半導體 素材에 적용하기 위하여 開發되고 있는 動向과 추후의 展望 등에 대해서 살펴보고자 하였다.

II. 半導體 素材의 評價를 위한 分析技術

半導體 기술은 超高純度를 가진 原材料를 시작으로 하여 초박막, 초미세선폭 및 초미세구조 등, 매우 미세한 재료를 대상으로 하기 때문에 일반적인 재료에 비하여 매우 精密하고 미세한 가공기술을 요구하고 있다. 그러므로 이와 같은 素材를 대상으로 한 分析技術 또한 정밀하고 정확도가 높은 기술을 사용해야 한다. 예로서, 순수한 실리콘 재료에 ppb 단위로 함유된 不純物의 농도분포를 깊이에 대하여 수 nm 간격으로 측정하는 일이라든가, 표면에 형성된 수 nm 두께의 自然酸化膜(native oxide)에 대하여 構造 및 化學狀態를 분석하는 일, 그리고 반경이 수 nm인 초미세 결정결함을 직접 관찰하고 그 구조를 해석하는 일 등이 이에 속한다. 특히 半導體 技術의 高速·高集積化에 따라 半導體 素子를 구성하는 多層 薄膜은 더욱 얇아지고 구성재료 또한 다양해지고 있으므로 이러한 박막 간의 界面特性에 대한 정확하

고 정밀한 분석 또한 분석기술의 새로운 요구사항으로 등장하고 있다. 그림 1은 記憶素子인 DRAM의 개발동향과 그에 따른 工程材料的 變遷推移를 나타낸 것이다. 사용되는 재료의 종류는 '70년대에 5종에 이르다가 '95년도에는 20여종에 이를 것으로 전망되며 構成元素 또한 5종에서 15종으로 증가할 것으로 예견된다. 결국, 半導體素材는 공정기술의 특성상 다양한 종류의 재료에 대하여 極微小 領域, 極微量의 元素, 極微細 缺陷의 관찰 및 極表面의 화학 분석기술을 保有해야 한다는 것을 알 수 있다.

이와 같은 정밀 분석기술은 모두 고가의 첨단기기를 필요로 하며 半導體 加工技術 못지않은 기술축적 및 know-how를 要求한다. 그리고 공통적인 사항은 대부분의 분석과정 이 초고진공에서 이루어진다는 사실이다. 정밀 기기분석의 원리는 그림 2와 같이, 分析하고자 하는 素材의 表面에 適당한 入射빔(probe)을 선택하여 투사한 후 이들이 素材의 構成原子 및 電子들과 상호 작용한 후 발생시키는 放出信號(signal)를 적정 檢出器(detector)로써 檢出하여 그 에너지나 파장의 스펙트럼을 해석하거나 image를 만들어서 分析하는 것이다. 이때의 주위 분위기는 高眞空으로 유지하여 신호빔이 기체분자와 散亂하는 것을 방지해야 한다. 입사빔은 용도에 따라서 電子線(electron beam), 이온선(ion beam) 및 X-선 등을 선택

하며 亦外線이나 可視光線, 또는 특수한 목적에 따라 放射線이나 中性子線이 사용되기도 한다. 이러한 입사빔은 시편의 내부에서 여러가지 상호작용을 하면서 신호전자, 이온 및 X-선 등을 방출하는데, 방출된 신호는 試片 原子에 대한 情報를 가지고 있으므로 필요에 따라 質量, 에너지 및 파장 등을 分析하면 원하는 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이때에 사용되는 입사빔의 종류와 검출하는 신호의 종류에 따라 분석기술의 名稱이 결정된다. 예로서 AES(auger electron spectroscopy)는 電子線을 입사빔으로 하여 시편에서 방출되는 여러가지 신호 중 auger 電子를 검출, 그의 에너지와 強度(intensity)를 스펙트럼으로 분리하여 解析하는 기술이다. ESCA(electron spectroscopy for chemical analysis)로도 불리우는 XPS(X-ray photoelectron spectroscopy)는 전자선 대신에 X-線을 입사빔으로 하여 방출되는 光電子(photoelectron)를 검출하는 기술이다. 현재 素材의 평가를 위해서 사용되는 분석기술의 주요 특성에 대하여 표 1에 나타내었다.

일반적으로 半導體 素材에 적용하기 위하여 가장 많이 사용되는 정밀 分析技術은 이른바 3대 表面分析技術인 SIMS(secondary ion mass spectrometry), AES(auger electron spectroscopy) 및 ESCA(electron spectroscopy for chemical analysis)를 비롯하여 1981년 이후 그 측정방법의 특성상 크게 각광을 받기 시작한 RBS(rutherford backscattering spectroscopy)를 들 수 있다. 그리고 光學顯微鏡으로서 감당할 수 없는 미세부위의 관찰을 위하여 TEM(transmission electron microscopy)과 SEM(scanning electron microscopy)등의 電子顯微鏡이 탁월한 分解能을 바탕으로 半導體 技術開發에 널리 이용되고 있다. 또한 結晶性 재료의 缺陷이나 結晶方位 및 構造를 분석하기 위해서 X-線回折 技術(XRD)과 電子線 回折技術(TED)이 응용된다. 각각의 분석기술들은 나름대로의 장단점이 있어서 고유의 특성을 최대한 발휘할 수 있는 분야가 있다. SIMS의 경우 시편을 구성하고 있는 원소의 이온을 직접 검출, 그의 質量을 분석함으로써 시편에 대한 元素分析 및 濃度의 측정을 ppb 단위까지 수행할 수 있는 능력이 있다. 그러나 이와 같은 탁월한 檢出限界(sensitivity)는 空間分解能(resolution)과 相反關係에 있어 分析領域이 상대적으로 커지게 되며, 半導體 回路가 구성된 시편에 대해서는 실제로 적용이 어려운 실정이다. 반면에 AES 분석기술은 전자선을 매우 작은 영역으로 집중시킬 수 있으며 검출되는 auger 전자가 극표

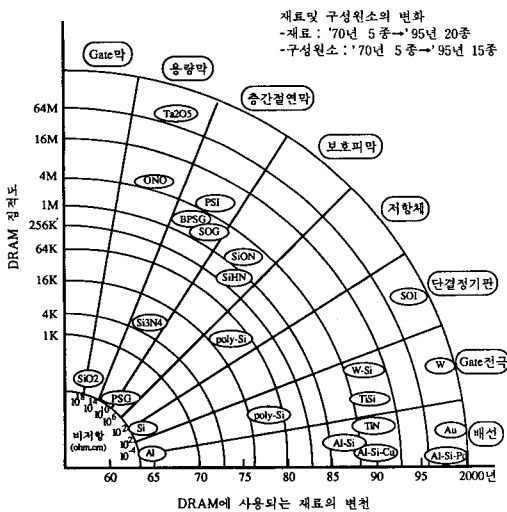


그림 1. DRAM 技術의 開發動向에 따른 工程材料의 變遷推移

표 1. 代表的인 精密 分析技術의 主要特性 및 應用分野

	ESCA	AES	SIMS	RBS	XRF	FTIR	TEM	XRD
분석 부위	표면(4nm)	표면(1-4nm)	표면(0.3-1nm)	표면 및 박막	박막 및 bulk	박막 및 bulk	박편	박막 및 bulk
검출 원소	all above H	all above He	all above H	all above He	all above Be	all above H		
Detection limit (atom %)	0.3-1	0.1-1	10^{-7} - 10^{-1}	0.01-10	0.01	ppb 이상		
Probe particle	X-ray	electron	ion	ion	X-ray	photon	electron	X-ray
Detected particle	photo electron	Auger electron	secondary ion	backscattered ion	fluorescence	photon	electron	X-ray
진공도	$<10^{-10}$ Torr	$<10^{-10}$ Torr	$<10^{-8}$ Torr	$<10^{-6}$ Torr	$<10^{-3}$ Torr	atm	$<10^{-7}$ Torr	atm
특 징	원소의 화학적 결합상태 분석	미소 부위에 대한 원소의 조성 분석	극 미량 원소 분석	박막의 비파괴 원소 분석, 정량 표준 시편 불필요	박막 및 bulk의 원소 조성분석, 표준시편 불필요	박막 및 bulk의 원소 조성 및 화학적 결합 상태 분석	극 미소부위 관찰 (3 Å 해상력)	비파괴, 결정구조 분석
활용 분야	표면 원소의 화학적 결합 상태 연구	미소부위에서의 원소 조성연구, depth profile, 표면 원소분석	극미량 원소의 doping profile contamination 원소 분석	비파괴 깊이 profic, 박막 두께측정 damage 측정	박막 두께측정 원소 조성분석	불순물 농도 박막두께 측정, 원소 조성 및 결합상태 측정	미세 구조의 형상관측 및 극 미소부위의 결정구조 분석	결정구조 및 stress, 결정결함 연구

면으로부터 방출되는 신호이므로 직경 50nm 이내에서 극미소 영역에 대한 化學分析이 가능하지만, 검출한계는 상대적으로 취약하여 0.1% 내외에 이르므로 半導體 표면에서 존재하는 극미량의 원소분석에는 곤란한 점 등이 있다. 그러므로 이와 같은 분석기술들은, 가지고 있는 長點을 최대로 살리고 서로의 분석결과를 相互 補完함으로써 종합적인 분석이 가능하다.

Ⅲ. VLSI/ULSI 適用을 위한 分析技術의 開發動向

半導體 技術이 초고속·초고집적화됨에 따라

(i) 分析對象 재료의 형태가 bulk로부터 박막, 표면으로 변화되고,

(ii) 物理的 크기가 結晶으로부터 slice, chip, 個別素子 原素(device element)로 감소하고,

(iii) 原素濃度가 主成分(major component)으로부터 dopant (1~100ppm) 및 極微量(trace element; <1ppm)으로 감소되고 있다. 이에 따라 분석기술 또한 高感度分析(high sensitivity analysis)과 微小領域分析(microvolume analysis)이 필수불가결하게 되었다. 그런데 미소부위의 분석을 위하여 입사

빔의 직경을 감소시키면 높은 入射 電流密度에 의하여 시편의 損傷이 증대되고, 입사빔의 전류를 감소시키면 시료로부터의 勵起(excitation)가 감소함으로써 결국 感度(sensitivity) 감소 및 檢出限界(detection limit)의 저하를 초래한다. 이러한 분석기능의 한계 내에서 원하는 분석데이터를 도출해내기 위해서는, 입사빔과 재료와의 相互作用에 의해 원하는 신호빔이 放出되는 과정에서 부터 檢出器를 통해 分析데이터가 얻어질 때까지의 基本的 理論과, 裝備의 構成原理에 이르는 전 과정의 바른 이해와, 각 분석기법의 특수한 역할 및 장·단점들의 명확한 파악이 이루어져야 한다. 더욱이 얻어진 분석데이터의 정확한 해석은 재료 내역의 이해와 많은 경험을 필요로 한다. 이에 분석기술에 대한 연구의 필요성이 대두된다.

현재까지 개발된 精密 分析技術은 半導體 素材에서 요구하는 사항을 모두 만족시키기에는 미흡한 점도 있지만 여러가지의 분석결과를 종합적으로 검토하고 비교하면 언고자 하는 데이터를 도출할 수도 있을 것이다. 그러나 보다 신속하게 결과를 얻기 위해서 분석기술에 대해 현재에도 많은 연구가 이루어지고 있는데 그 開發動向은 다음과 같다. 보다 작은 面積에 대하여, 보다 적은 量을 보다 正

確하게 檢出하고 觀察하는 기술이 요구되고 있으며, 또한 이와 같은 기술들이 보다 빠른 시간에 이루어 지도록 하는 방향으로 기술개발이 행해지고 있다. 위에서 언급한 바와 같이 檢出感度 (sensitivity)와 空間分解能 (resolution)은 서로 상반적인 관계를 가지고 있어 필연적으로 한 부분의 저하를 요구하고 있으나 기기의 hardware 개발과 함께 software의 혁신적인 개발에 따라 두가지를 모두 만족할 수 있는 기술이 연구되고 있다. 먼저 素材의 분석에 있어 미세영역에 대한 관찰기술 분야를 보면, 광학현미경의 분해능을 벗어나 이미 SEM(走射電子顯微鏡)이 일반화되어 있으나 絶緣體 (insulator)에 대한 관찰이 어려운 점과 結晶缺陷이나 微細缺陷의 직접관찰이 불가능한 단점이 있다. 이러한 점은 TEM(透過電子顯微鏡)으로서 분해능의 개선과 함께 분석능력의 향상을 가져온 반면, 서로의 제작이 어려워 보편화되지 못한 면이 있다. 최근에는 TEM용 薄片試料의 제작을 위한 기술의 개발에 많은 연구를 집중하고 있는 실정이며, 이에 대한 know-how를 보유하고 있는 분석기관이 많이 있다. 이외에도 AES에 走射機能을 첨가하여 SAM (scanning auger microscope)이라고 하는 元素分布圖 分析器 및 SIMS에 이온주사기능을 부착, 해당원소의 2차원적 농도분포를 측정하는 기술이 최근 개발되었다. 따라서 단순한 觀察機能은 化學分析 機能과 결합하여 綜合的인 分析技術의 경향으로 움직여가고 있다. 素材의 助成에 대한 정밀 분석기술은 공간분해능 (resolution)과 검출감도 (sensitivity)를 동시에 향상시키기 위하여 여러가지 측면에서 연구개발되고 있는데 전자선을 입사빔으로 하는 분석기술의 경우 電子銃을 電界放射形 (field emission)으로 개선하여 매우 작은 면적에 높은 전류밀도로 집속시키는 방법이 개발되어 상업화하고 있으며 이에 따른 檢出器의 고급화에 많은 연구가 이루어지고 있다. SIMS는 최대 단점인 수평방향 분해능을 개선하기 위해 입사 이온빔을 集束시키는 기술을 개발 중인데 현재 0.4 μ m직경까지 상업화되어 있으나, 半導體 素子の 직접 분석에 적용되기 위해서는 그 이하 전자선의 집속능력까지 도달해야 한다. 이를 위하여 보다 강한 이온 source와 보다 정밀한 검출기의 개발이 필요하며 眞空技術에 의한 補強이 되어야 한다. X-선의 경우 전자나 이온처럼 進行方向을 변경하여 작은 면적에 집속시킬 수 없으므로 수평분해능을 개선하기 위해서는 보다 강한 power의 X-선 source가 개발되어야 한다. X-선 레이저 開發이 실용화하면

이 분야의 분석기술에 큰 전환점이 될 것으로 전망된다. 현재로서는 X-선이 結晶性 材料의 회절분석에 가장 많이 사용되며, 半導體 素材에는 topography를 이용한 결정결함의 관찰 및 분석에 적용되고 있다.

이와 같은 分析器機의 開發과 함께, 檢出된 신호호로부터 최종적인 分析결과를 얻기까지의 과정에서 사용되는 software의 開發이 절실히 요구된다. 도출된 결과의 再現性, 信賴度를 향상시키고 신속·정확한 分析이 이루어지기 위해서 이미 대부분의 分析技術은 microprocessor에 의해 自動化되어 있는데, 이들 器機의 自動化와 함께 分析데이터를 자동적으로 해석하고 처리하며 연구하는 결과를 신속하게 제시해 줄 수 있는 software의 開發이 있어야 한다. 최근에는 분석데이터의 統計的 처리를 위한 database software가 소개되고 있으며, 각 분석기기 간의 데이터를 상호 교환, 비교 검색하는 software도 개발되고 있다. 대부분의 분석결과는 CRT 화면을 통하여 영상으로 처리되거나 printer 및 plotter를 통해 도출되고 있는데 computer를 이용한 image simulation으로서 機械的으로 얻어낸 결과로부터 그 이상의 데이터를 얻어내는 것도 하나의 분석기술 분야이다.

따라서, 분석기술은 對象材料 (試片의 製造內譯)

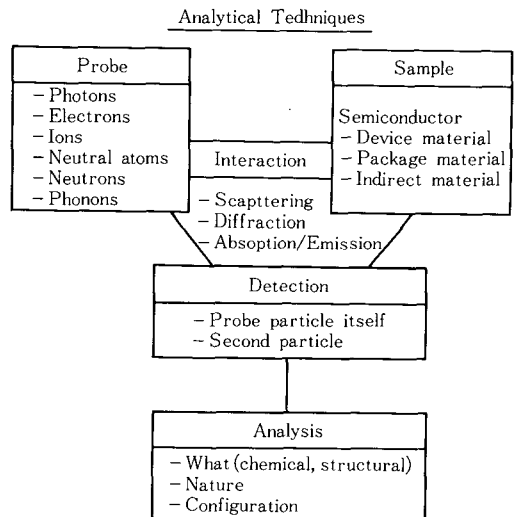


그림 2. 精密 分析技術의 基本的인 概念으로 入射빔과 試片의 相互作用으로 信號빔이 시편으로부터 放出한다.

와 測定技法 (分析器機에 의존), 그리고 解析技法이 조합된 것이라고 할 수 있다. 이러한 분석기술이 효율적으로 개발되고 응용되기 위해서는 應用分野 研究員 (application researcher) 과 材料關聯 專門家(materials specialist) 및 分析專門家 (analytical specialist) 들의 긴밀한 상호 협조체제가 필요하다. 재료 상의 문제가 발생했을 때를 예를 들면, 응용분야 연구원은 問題現狀 및 問題發生 經緯를 정확하고 자세하게 제시해야 재료전문가는 문제를 정확히 인식하여 가능한 原因을 도출하고 이를 확인, 증명하기 위해 어떤 종류의 정보가 필요한지를 결정한다. 이에 대해 분석전문가는 最適 分析技法을 선택하고, 分析節次圖 및 sampling 과정을 통하여 최적조건의 측정에 의해 data를 추출하고 그 data를 해석한다. 이러한 3자간의 긴밀한 협조체제 아래에서 문제의 원인이 규명되고 해결방법이 모색될 수 있을 것이며, 한편으로는 분석 신기술의 창출기반이 확립될 수 있을 것이다.

IV. 맺 음

VLSI/ULSI 시대의 도래와 함께, 이에 따른 表面分析技術의 현황과 開發動向을 조사하였다. 半導體 技術은 규히 純粹한 재료와 淸淨한 분위기에서 이루어지는 작업인 만큼 매우 微細한 부위까지도 철저한 檢査와 分析이 요구된다. 그러므로 이들 素材를 측정하고 分析하는 일은 대단한 精密性을 요한다. 점차 微細화, 복잡화하는 工程技術의 추세에 따라 이와 같은 요구사항이 점차 엄격해질 것이며 이를 위한 分析技術의 開發이 뒤따라야 한다. 끝으로, 素材 分析의 목적은 素材의 특성을 이해하여 이것들을 기능적·경제적 측면에서 보다 유용하게 만드는 것이다. 아무쪼록 産·學·研 관련분야 전문가들의 긴밀한 상호 협조 하에 국내에서도 선진 素材分析技術의 早期確保가 이루어지기를 기대한다.

參 考 文 獻

[1] P.S. Burggraaf, "The Role and Use of Failure Analysis Service," *Semiconductor International*, p. 44, Sep. 1984.

[2] R. Linder, et. al., "Surface analysis in Semiconductor Fabrication," *Microelec. Manuf. Testing*, Feb. 1985.

[3] P.H. Singer, "Surface Analysis Technology Part I," *Semiconductor International*, p. 46, July 1986.

[4] 한국전자통신연구소, Material Analysis Center 수립가능성 조사, p.24, 1986.

[5] C.A. Evans, Jr. et. al., "Overview of Ion and Electron Beam Techniques for the Analysis of Electronic Materials," *Proc. of Microelec. Measurement Tech. Seminar*, p. 10, Mar. 1980.

[6] 백문철 등, "표면분석기술의 반도체 응용(I)," 한국전자통신연구소, 전자통신, 제 8 권 제 4 호, 1987.

[7] D. Briggs and M.P. Seah, *Practical Surface Analysis*, John Wiley & Sons, 1983.

[8] D.A. Skoog, "Principles of Instrumental Analysis," Holt Saunders, 1985.

[9] D.E. Newbury et. al., *Advanced Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, Plenum Press, NY, 1986.

[10] I.D. Ward et. al., "Analysis Methods Complement each other in Surface Studies," *Ind. Res. & Dev.*, Sep. 1983.


[11] A. Benninghoven et. al., *Secondary Ion Mass Spectrometry*, John Wiley & Sons, 1987.

[12] R.L. Chaney, "Recent Developments in Spatially Resolved ESCA," *Tech. Note*, Surface Science Lab., 1984.

[13] Norman G. Einspruch, "VLSI Electronic Microstructure Science," vol. 6 - *Materials and Process Characterization*, Academic Press, NY, 1983.

[14] J.W. Edington, "Practical Electron Microscopy in Materials Science," *McMillan Phillips*, Tech. Lab., 1975.

[15] A.M. Glauert, *Practical Methods in Electron Microscopy*, North-Holland Pub., 1974.

[16] 津室英樹, "ULSI 半導體 Process 材料技術", *Semiconductor World*, Feb. 1990. 

筆者紹介



白 文 哲
 1957年 9月 11日生
 1979年 2月 서울대학교 공과
 대학 자원공학과 졸업
 1982年 2月 한국과학기술원
 재료공학과(석사)
 1990年 8月 한국과학기술원
 재료공학과(박사)

현재 한국전자통신연구소 물성분석연구실 선임연구원
 주관심분야: 반도체 소재를 대상으로 한 TEM 정밀
 관찰기술



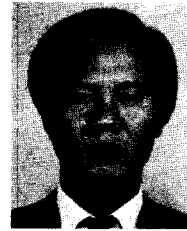
李 仲 煥
 1956年 12月 3日生
 1980年 2月 부산대학교
 화학과 졸업
 1982年 2月 한국과학기술원
 화학과(석사)

현재 한국전자통신연구소 물성분석연구실 선임연구원
 주관심분야: 반도체 소재를 대상으로 한 AES 분석
 기술



趙 庚 翼
 1955年 8月 24日生
 1979年 2月 울산대학교 공과
 대학 재료공학과 졸업
 1981年 2月 한국과학기술원
 재료공학과(석사)

현재 한국전자통신연구소 물성분석연구실 선임연구원
 주관심분야: 반도체 소재의 결정성 분석기술



權 五 準
 1951年 7月 18日生
 1977年 2月 경북대학교 공과
 대학 전자공학과 졸업
 1988年 2月 경북대학교 산업
 대학원 전자공학과(석사)

현재 한국전자통신연구소 물성분석연구실 실장
 주관심분야: 반도체 제조공정 및 소재 분석기술