실리콘밸리 탄생 60주년 : 그 혁신 기술과 주역들

DOI: 10.3938/PhiT.26.036

부 경 호

Protagonists and Innovative Technologies for Birth of Silicon Valley

Gyoung-Ho BUH

60 years ago, on September 18, 1957, eight young scientists and engineers submitted resignation letters to William Shockley, a Nobel laureate, and started their own company. Shockley called them “eight traitors”. The shameful act at that time became a genesis of Silicon Valley. Their inventions and successful commercialization of the planar process and integrated circuit paved a way for the new industry of silicon. A close look at their high-tech achievements shows that a major driving force for the birth of “Silicon Valley” was diverse background of the members and solid foundation in basic research.

들어가는 글

60년 전인 1957년 9월 18일 마침내 8명의 젊은 과학기술자들은 노벨상 수상자인 쇼클리(Shockley)에게 사직서를 제출한다.^[1] 쇼클리의 권위주의적이고 편집증적인 관리방식에 반기를 들고 그들만의 트랜지스터 회사를 차리겠다고 뛰쳐나온 것이다. 쇼클리는 이들을 “8명의 배신자”라고 불렀다. 오늘날 자기가 일하던 회사를 뛰쳐나가 동종분야의 회사를 시작하는 것은 실리콘밸리의 흔한 문화로 자리 잡았지만, 당시에는 부끄러운 행동으로 불렸다. ‘8명의 배신자’들이 설립한 ‘페어차일드 반도체社(Fairchild Semiconductor)’는 로버트 노이스(Robert Noyce)와 고든 무어(Gordon Moore)의 주도 속에 플래너 공정

저자약력

부경호 박사는 서울대학교 물리학과 박사(2001)로서 미국 국립표준기술연구원(NIST), 삼성전자 반도체연구소, 한국화학연구원, 특허청 특허심사관, 국가지식재산위원회를 거쳐 현재 기초과학연구원 이노베이션팀에서 변리사로 재직 중이며, KAIST 문술미래전략대학원에 재학 중이다. (gungho.buh@gmail.com)

(Planar Process)과 집적회로를 발명·상용화 시키고, 그 유명한 ‘무어의 법칙’도 발표한다. 이들의 혁신 기술은 미국 캘리포니아 주 샌프란시스코 만 남부 지역에 ‘실리콘 반도체 산업’의 길을 닦게 된다. 1950년대 중반까지만 하더라도 아름다운 과수원의 풍경으로 유명한 시골마을 ‘산타클라라 밸리(Santa Clara Valley)’는 1971년 저널리스트 돈 호플러(Don Hoefler)의 ‘Silicon Valley USA’라는 보고서 이후 첨단기술 혁신의 산실을 상징하는 ‘실리콘밸리(Silicon Valley)’로 그 이름이 굳어지게 되었다. 1960-70년대 인텔 등 실리콘 반도체 기업, 1980년대 애플 등 컴퓨터 기업, 1990년대 야후, 이베이, 구글 등의 인터넷 기업으로 그 주도권을 이동시키면서 여전히 ‘실리콘밸리’는 첨단기업들로 생동하는 혁신의 메카로 자리잡고 있다. 동부 연안의 벨연구소의 트랜지스터로부터 서부 연안에서 이루어진 집적회로 혁명에 이르기까지의 첨단 기술 개발과 산업화의 과정, 그리고 주인공들의 활동을 살펴보면, 실리콘 밸리의 창업생태계를 형성시킨 동인(動因)을 천착해 본다.

실리콘 밸리의 개척자들과 그 궤적

1. 벨연구소의 트랜지스터의 발명

1947년 벨연구소에서 발명한 점접촉 트랜지스터(point-contact transistor)는 이론 물리학자 바딘(Bardeen)과 실험 물리학자 브래튼(Brattain)의 공동발명의 결과였다. 벨연구소는 특허부서의 조사과정을 거쳐, 개발팀장인 쇼클리(Shockley)를 발명자에서 배제하기로 한다. 이렇게 된 데는 쇼클리의 독단과 편집증적인 성격 탓이 컸다. 그러나 쇼클리는 단독으로 접합트랜지스터(junction transistor)를 발명하는데, 이는 쇼클리의 천재성을 보여줄 만큼 실용적으로 뛰어난 발명이었다. 벨연구소는 전자는 바딘과 브래튼을 발명자로 후자는 쇼클리를 단독 발명자로 특허를 각각 출원하였다. 바딘과 브래튼은 그 후 쇼클리 밑에서 일하지 않게 되었지만, 1951년 바딘은 연구소장

REFERENCES

- [1] Arnold Thackray, David C. Brock and Rachel Jones, *Moore's Law* (Basic Books, 2015), p.166.

Fig. 1. (a) Photo of (from left) John Bardeen, William Shockley and Walter Brattain, 1948. Although Shockley was not involved in the invention of the point-contact transistor and has never been listed on the patent application, Bell Labs decided that Shockley must appear on all publicity photos along with Bardeen and Brattain. From: <https://flic.kr/p/eQL3GL>, (b) 'Silicon Valley' area with starred sites of (from left) Stanford Research Park, Shockley Lab., Fairchild Semiconductor, Intel origin. Image from Google map, <https://goo.gl/maps/f3L2Kck9Yfu>.

인 켈리에게 다음과 같은 사직서를 남기고 일리노이 대학교로 자리를 옮긴다.

“... 본인의 고충은 트랜지스터의 발명으로부터 시작됐다. ~ 발명을 선보인 직후에 쇼클리리는 팀원 중 누구도 이 문제를 연구하지 못하도록 했다...”^[2]

바딘의 사직과 더불어 브래튼의 문제 제기로 쇼클리의 벨 연구소에서의 입지는 어려워졌지만, 쇼클리는 개의치 않았다. 캘리포니아로 가서 자신만의 사업을 시작해서 수백 만 달러를 벌어들일 꿈을 꾸고 있었다.

이즈음, 벨연구소에서 TI社(Texas Instruments Inc.)로 이동한

a) 현재 'Stanford Research Park', Xerox 연구소, Lockheed, Facebook 및 Tesla Motors의 산실이다.

고든 텔(Gordon Teal)은 1954년 실리콘 트랜지스터를 학회에서 발표하여 당대의 기술자들을 깜짝 놀라게 하였고, 같은 해 말 이를 탑재한 최초의 휴대용 라디오인 '리젠시 Tr-1'을 TI社는 인디애나주의 한 회사와 공동으로 출시하였다. 트랜지스터가 진공관을 대체하는 것은 자명하였고, 이를 활용한 새로운 산업의 서막이 오르고 있었다.

2. 실리콘밸리 최초의 반도체 회사 - 쇼클리 랩(Shockley Lab.)

쇼클리는 UC 버클리, 예일대 교수직 제의를 거절하고 자기의 아이디어를 실현할 수 있는 자기만의 회사를 희망했으며 마침내 아놀드 벡맨(Arnold Beckman)의 투자를 받게 되었다.^[3] 1955년 양측은 새로운 회사의 설립 대신 벡맨인스트루먼트社의 새로운 부서로 그들의 사업을 시작하기로 하였고, 쇼클리의 고집대로 쇼클리의 고향이고 그의 모친이 살고 있는 샌프란시스코 만 지역 '팔로 알토(Palo Alto)' 지역에 쇼클리 반도체 랩(Shockley Semiconductor Lab.)을 설립하였다. 실리콘밸리 최초의 반도체 제조 기업이 탄생한 것이다.

당시의 '팔로 알토'는 과수원으로 둘러싸인 대학 도시였으며, 록히드 마틴의 미사일 사업부와 휴렛팩커드가 첨단 기술 기업의 선구자 역할을 하고 있었다. 스탠퍼드 공과대학의 학장직을 맡은 프레드 터먼(Frederick Terman)은 1951년 '팔로 알토' 지역의 대학 소유 토지에 스탠퍼드 산업단지(Stanford Industrial Park)^{a)}를 조성하여, 기업을 대상으로 바겐세일 가격으로 기업들을 유치하고 있었다. 터먼은 쇼클리가 '팔로 알토'에 새로운 회사를 세우고 싶어 한다는 소식을 듣고, 쇼클리에게 편지를 쓴다. 스탠퍼드는 이미 반도체 관련 직원을 채용하고 트랜지스터를 이미 교과과정에 포함시켰으며, 졸업생을 채용할 수 있는 프로그램을 소개하면서, 산학협력으로 서로의 이익을 키워나갈 수 있음을 강조하였다.^[4]

먼저, 쇼클리는 벨연구소의 연구원들을 스카우트하려 했지만 악명 높은 쇼클리와 같이할 사람은 없었다. 결국 쇼클리는 전국의 반도체 관련 엔지니어들을 찾아 직접 전화를 걸거나 직접 방문하여 스카우트에 나설 수밖에 없었으나, 이는 훗날 실리콘밸리의 토대를 닦는 경이로운 인재 채용이 된다. 집적회로를 발명하고 인텔을 설립하는 로버트 노이스(Robert

REFERENCES

- [2] Walter Isaacson, *The Innovators: How a Group of Hackers, Geniuses, and Geeks Created the Digital Revolution* (Simon and Schuster, 2014), p. 153.
- [3] David C. Brock, "Shockley's Robot Dream", IEEE SPECTRUM, Dec. p.41 (2013).
- [4] Leslie Berlin, *The man Behind the microchip* (Oxford University Press, 2005), p. 57.

Noyce)와 “무어의 법칙”으로 유명한 화학자 출신의 고든 무어(Gordon Moore)를 비롯하여 수십 명의 20대의 젊은 과학기술자들을 채용하게 된다. 쇼클리가 채용한 젊은이들은 탁월한 재능과 함께 화학·기계·전기공학·재료공학·광학 등 다양한 전문 분야를 망라하였다. 최고의 유능한 인재들을 미국 동부에서 지금의 실리콘밸리로 불러들인 쇼클리를 ‘실리콘 밸리의 모세’라고 부른다.^[5]

3. 8명의 배신자 ‘페어차일드 반도체’를 설립하다

쇼클리의 편집증적인 관리 스타일은 젊은 연구원들을 고달프게 하였다. 월요일 아침 기술회의가 끝날 쯤 쇼클리는 각자에게 업무를 지정해놓고 그날 정오에 “그거 어떻게 되었냐고?” 재촉하는 식이었다.^[6] 연구개발은 자기의 통제하에 수직적으로 이루어져야 했고, 팀원들간의 상호 협업 또는 의견 교환보다 자기의 지도 편달이면 충분하다고 생각하였다. 여비서가 출입문의 금속 돌출부에 손을 다쳤을 때, 사립탐정과 거짓말 탐지기를 동원한 일은 유명하다. 쇼클리는 방해공작(sabotage)으로 의심하였다.^[7]

1956년 노벨상 수상 이후 쇼클리는 4층의 pnpn 다이오드에 전적으로 매달리는데, 노이스, 무어에게는 가망성이 없어보였다. ‘실리콘 트랜지스터’를 구현하려던 회사 창립시의 비전을 완전히 잃어버린 것이다.

마침내, 1957년 9월 18일, 쇼클리 문하의 젊은이 8명은 사직서를 제출한다.^[1] 고든 무어, 줄리어스 블랭크(Julius Blank), 빅터 그리니치(Victor Grinich), 진 호어니(Jean Hoerni), 유진 클라이너(Eugene Kleiner), 제이 래스트(Jay Last) 그리고 쉘던 로버츠(Sheldon Roberts), 그리고 마지막까지 합류하기를 망설였지만 결국 이들의 리더가 되는 로버트 노이스까지 총 8명이었다. 쇼클리는 이들을 8명의 배신자(traitorous eight)라 불렀다. 백만은 그들이 떠나는 마지막 날 그들을 불러 모아 그들에게 불충하고, 부끄러운 행동이라고 하고, 등애다 칼을 찌는 배신의 행위라고 비난했다. 그러나 그 순간이 훗날 어떠한 역사적 의미를 갖게 될지 아무도 알지 못했다. 이들은 자기들을 고용해줄 회사를 찾았으나, 이들의 요청 편지를 읽은 월스트리트의 아서 락(Arthur Rock)은 이들에게 직접 회사를 차리라고 제안하고, 페어차일드 카메라社를 투자가로 소개시켜 준다. 실리콘 밸리에서 벤처 캐피털의 모델이 시작되는 순간이다.

8명의 배신자들이 설립한 페어차일드 반도체社는 회사를 수평적 조직(horizontal organization) 및 자율적 연구 등과 같이 오늘날의 전형적인 “실리콘 밸리”식으로 운영하였다. 이러한 풍토가 형성된 데는 회사의 실질적 관리자인 노이스의 역할이 컸다. 이들은 시대를 선도하는 첨단기술들을 발명하고 이를 바

Fig. 2. The eight engineers and scientists, including Robert N. Noyce (right) and Gordon E. Moore (standing second from left), who co-founded Fairchild Semiconductor in 1957, are pictured here on the firm's production floor in its early years. © 2005 IEEE. Reprinted, with permission, from “Robert Noyce and the tunnel diode”, IEEE Spectrum, May 2005, p. 49.

탕으로 트랜지스터의 시장을 석권하게 된다. 이후 ‘8명의 배신자들’을 비롯하여 페어차일드 반도체사의 직원들은 65개 이상의 신생 기업들을 직간접적으로 창업하게 되는데 노이스와 무어가 공동창업한 ‘인텔(Intel)’사와 Jerry Sanders가 창업한 Advanced Micro Devices(AMD)가 대표적이다. 클라이너는 1972년 벤처캐피탈 회사를 설립하여 수많은 벤처기업에 투자하는데, 아마존(Amazon)과 구글(Google)이 대표적이다. 페어차일드 반도체 창업가들의 성공 자금은 지금의 실리콘밸리 벤처창업 생태계의 자금의 씨앗이 되었고, 성공 경험과 기업 문화는 스티브잡스(Steve Jobs) 등과 같이 후배 기업가들에게 전수되게 된다. 노이스는 스티브 잡스의 멘토였고, 스티브 잡스는 다음과 같이 말하기도 하였다. “나는 노이스로부터 경이로운 실리콘밸리의 향기를 느끼고 싶었다.”^[8]

실리콘밸리 탄생의 혁신기술들

1. 벨연구소의 트랜지스터 기술

1947년 바딘과 브래튼이 발명한 점접합 트랜지스터의 구조는 표면이 금속박(gold foil)으로 된 에미터와 콜렉터를 역학적 힘으로 눌러 게르마늄의 베이스에 접촉시키는 구조였다. 점접합 트랜지스터는 외력으로 눌러주는 역학적 기능을 구비해야

REFERENCES

- [5] M. Riordan and L. Hoddeson, *Physics Today* 50(12), 42 (1997).
- [6] Computer History Museum, “391 San Antonio-A Semiconductor Documentary” <https://youtu.be/yLNh4UY5ohw> (2009).
- [7] Leslie Berlin, *The man Behind the microchip* (Oxford University Press, 2005), p. 70.
- [8] Leslie Berlin, *The man Behind the microchip* (Oxford University Press, 2005), p. 252.

Fig. 3. The core technologies which cultivated 'silicon valley'.

하므로 대량 생산에 부적합하고 그 동작의 신뢰성도 불안정하였다. 쇼클리가 팀원들 몰래 단독으로 개발한 접합트랜지스터(junction transistor)는 실용성에 있어서 매우 획기적이었고, 쇼클리는 그 동작에 대한 물리적 이론까지 제공하였다. 쇼클리는 p-n 접합의 전압에 따른 전류의 값을 설명하는 쇼클리 다이오드 방정식을 1949년 발표하여 반도체 소자물리의 이론적 토대를 제공하는 천재성을 발휘하기도 한다.^[9] 1954년 TI社は 쇼클리의 접합트랜지스터를 실리콘으로 상용화시켜 업계를 깜짝 놀라게 하면서 그해 이를 탑재한 포켓 라디오를 내놓아 진공관을 대체한 전자산업을 본격적으로 궤도에 올리게 된다.

1955년 벨연구소에서 개발된 메사 트랜지스터(mesa transistor)는 실리콘의 웨이퍼를 에칭에 의해 계단 모양으로 깎아 내고 컬렉터 위에 베이스와 에미터를 주위면보다 튀어나오게 되어 메사 모양이었다. 이는 당시 획기적인 성능을 자랑하게 되었는데, 컬렉터와 베이스의 접합면의 면적을 에칭으로 조절하여 접합 정전용량(capacitance)을 낮추어 고주파에서 동작할 수 있는 최첨단 기술이었다.

페어차일드 반도체社가 설립된 같은 달, 1957년 10월 4일 스푸트니크호가 발사되었고, 이는 미소간의 우주경쟁이 시작됨을 의미하였다. 당시 미국 국방부와 나사는 미사일과 위성

쓰일 전자부품에 보다 안정적으로 고온에서도 동작하는 트랜지스터가 필요하였고 이는 실리콘 트랜지스터를 의미했다. 마침내 페어차일드 반도체社의 노이스는 IBM으로부터 미공군 폭격기의 컴퓨터에 조달될 매우 향상된 성능이 요구된 스펙의 트랜지스터 주문을 받는데 성공한다.^[10] 페어차일드 반도체는 최초로 실리콘 메사 트랜지스터를 1958년 5월 처음으로 성공적으로 상용화시켜 IBM에 납품하게 된다. 페어차일드社의 '메사 트랜지스터'는 시장에서 한동안 독보적인 가치를 누리지만, 이는 여전히 동부 연안의 벨연구소가 개발한 기술이었다.

2. 플레너 공정(planar process)과 플레너 트랜지스터(planar transistor)

메사트랜지스터는 베이스와 컬렉터 접합과 에미터와 베이스 접합이 표면에 노출되어 신뢰성에 문제가 있었다. '페어차일드 반도체'가 이룩한 최고의 혁신기술은 '플레너 트랜지스터(planar transistor)'와 이를 구현하는 '플레너 공정(planar process)'으로 트랜지스터의 신뢰성의 문제를 획기적으로 해결한다. 이는 이론물리학자 출신의 호어니가 발명하였다.^{b)} 산화막의 일부 영역을 오픈하여 불순물을 실리콘으로 확산시켜 컬렉터와 베이스 영역을 각각 형성시키고 산화막으로 오픈된 영역에 다시 보호막과 금속접촉을 형성하는 기술이다.^[11] 호어니의 아이디어의 핵심은 당시 불순물 확산의 마스크로 쓰였던 산화막을 신뢰성을 향상시킬 수 있는 보호막으로 생각해서 남겨두었다는 점이다. 부사장이었던 호지슨(Hodgson)은 호어니의 발명을 보고, 기존의 메사 구조의 트랜지스터와 달리 평평하게 생겨서 'planar transistor'라고 불렀으며 저작권을 부여하자고 하였다. 노이스는 산업계가 자기들의 기술을 일반적으로 받아들이는 경우 페어차일드가 얻을 광고 효과가 더 크다고 반대하였다. 호어니가 자신의 논문에서 발표한 바와 같이 플레너 트랜지스터는 접합면을 산화막이 보호하게 되어 신뢰성을 대폭 향상시켰을 뿐만 아니라, 벌크구조에서나 이론적으로 계산되는 매우 낮은 역방향 누설전류를 실현하였으며, 고온에서도 안정적 동작을 구현하였다.^[12] 노이스의

REFERENCES

- [9] W. Shockley, The Bell System Technical Journal **28**(3), 435 (1949).
- [10] Leslie Berlin, *The man Behind the microchip* (Oxford University Press, 2005), p. 92.
- [11] J. A. Hoerni, "Method of Manufacturing Semiconductor Devices," US, Patent 3,025,589 (Filed May 1, 1959. patented Mar. 20, 1962); J. A. Hoerni, "Semiconductor Device", US, Patent 3,064,167 (Filed May 19, 1960. patented Nov. 13, 1962)
- [12] J. J. A. Hoerni, "Planar Silicon Transistors and Diodes", IRE International Electron Devices Meeting, Oct. 27-29 (1960).

b) 호어니는 수학과 학사를 거쳐 박사학위를 두 군데에서 받는다. 그 중 Cambridge 대학의 박사 논문 제목은 "Photographic study of diffuse X-ray reflections"이다.

Fig. 4. Planar process for npn transistor. Note that all surface is passivated by SiO_2 , which enhances the reliability dramatically. All the metal contacts are formed only one-side of silicon wafer, which provide architectural base for IC invention. Figures are drawn based on Hoerni's patent claims.

예측대로 트랜지스터 공정의 표준이 된 플레너 기술은 페어차일드사는 물론 실리콘 밸리 자체를 당시 전자산업의 새로운 중추로 도약시키게 된다.

3. 집적회로(integrated circuit) 발명

페어차일드 반도체사의 대표적 혁신기술은 '집적회로 기술'이며, 바딘은 이를 '바퀴(wheel)'의 발명과 필적하는 것으로 평가하였다. 트랜지스터는 일종의 개별소자였다. 회로를 구성하게 되면 트랜지스터들을 서로 전기선으로 연결시켜야 했는데, 이는 연결해야 할 개별소자의 개수에 따라 복잡성이 지수 함수적으로 증가하는 문제가 있었다. 더불어 개별소자 각각의 독자성으로 전체 회로의 안정성도 문제가 되었다.

페어차일드는 1959년 3월 뉴욕 전시회에 당시 최첨단의 플레너 트랜지스터를 자신만만하게 선보였지만, TI社 부스에서 특허 출원된 신제품을 보고 긴장하지 않을 수 없었는데, 그것은 하나의 칩에 집적된 회로였다.^[13] TI社의 킬비(Kilby)는 1958년 여름에 집적회로 아이디어를 착안하고, 1959년 2월 6일 특허출원하였다.^{c)} 노이스는 이에 자극을 받아 호어니의 '플레너 공정' 기술을 바탕으로 집적회로를 추진하게 된다. 사실 기본적 개념은 이미 노이스가 1959년 1월 착안하여 연구 노트에 작성해두었지만 관련된 어떠한 일도 하지 않았다. 훗날 노이스는 이렇게 회상했다. "우리는 새로운 회사였고, 당시 기본적 생존을 걱정했던 시절이었다."^[14] 노이스는 1959년 7월 30일 집적회로 특허를 출원한다.^[15]

집적회로는 킬비가 먼저 발명하였지만 그의 발명은 소자의

단자끼리 별도의 금속 전선으로 연결하는 와이어링 작업이 필요하였다. 반면에 노이스의 집적회로는 기본적으로 금속막의 증착에 의하여 트랜지스터 단자와 금속 접촉이 형성되는 플레너 공정에서 증착된 금속막으로 배선을 형성하므로 별도의 와이어링이 필요하지 않았다. 노이스의 플레너 집적회로 기술은 당시의 트랜지스터를 이용한 전자부품의 신뢰성을 대폭 향상시켰다. 그러나 노이스의 집적회로 발명의 진가는 가격 경쟁력에 있다는 것을 노이스와 무어는 곧 알아차리게 된다. 이는 '무어의 법칙'의 토대가 된다.

4. CMOS(Complementary metal-oxide-semiconductor) 발명

1963년 페어차일드의 C. T. Sah와 Frank Wanlass는 1963년 컨퍼런스 논문에서 n 채널과 p 채널 MOS 트랜지스터를 상보적으로 결합한 로직 회로는 대기 모드에서 전력 소모가 제로에 가까워졌음을 보여 주었다. 이후 Wanlass는 오늘날 CMOS(Complementary metal-oxide-semiconductor)로 불리는 소자의 아이디어를 특허를 받는다.^[16] 상보적 트랜지스터 중에 하나는 항상 오프상태가 되므로 이들의 직렬로 연결된 조합은 온/오프의 상태가 바뀔 때만 전력(dynamic power)을 소모하게 되고 대기상태(stand-by)의 전류는 제로가 된다. CMOS 로직은 제조공정 및 축소화가 용이한 MOSFET^{d)}을 기본 소자로 이용하기 때문에 집적도를 획기적으로 높일 수 있었다. 당시 페어차일드 반도체의 R&D를 책임지고 있던 무어는 CMOS에 그리 관심을 보이지 않았지만, 훗날 그의 무어의 법칙을 40년간 실현시킨 마이크로프로세서는 CMOS 로직소자이고 현대의 대부분의 디지털 집적회로는 CMOS 소자이다.

5. 무어의 법칙(Moor's Law)

1965년 무어는, 지난 10년간 매 2년마다 반도체 칩의 트랜지스터의 개수가 2년마다 2배씩 증가한다는 경험적 관찰로부터 앞으로 10년간도 그럴 것이고 1975년이면 1개의 칩에 대

REFERENCES

- [13] Michael S. Malone, *The Intel Trinity* (An Imprint of Haper Collins Publishers, 2014), p. 18.
- [14] Leslie Berlin, *The man Behind the microchip* (Oxford University Press, 2005), p. 104.
- [15] R. N. Noyce, "Semiconductor Device-and-Lead Structure", US. Patent 2,981,877 (Filed July 30, 1959. patented April 25, 1961).
- [16] F. F. Wanlass, "Low stand-by power complementary field effect circuitry", US 3,356,858 (Filed June 18, 1963. Patented Dec. 5, 1967).

c) 킬비는 2000년 집적회로 발명으로 노벨물리학상을 수상한다. 노이스의 사후였다.

d) 벨연구소의 한국 출신의 강대원 박사가 발명하였다. "Electric field controlled semiconductor device" US 3,102,230 (Filed May 31, 1960. Issued August 23, 1963).

Fig. 5. (a) Moore's prediction at 1965, https://www.intel.com/press-room/kits/events/moores_law_40th, (b) Moore's law - the doubling of transistor counts every two years. By Wgsimon (CC BY-SA 3.0)

규모의 회로를 구축할 수 있을 것이라고 예측하였다.^[17] 훗날 이를 두고 사람들은 '무어의 법칙'이라 명명되게 되었고 이는 현재까지 50년간 작동하는 그야말로 법칙이 되었다. 이러한 축소화에 따른 이득에 대하여, 디램의 발명자이기도 한 IBM의 Dennard가 트랜지스터 수준에서 소자물리 이론을 1974년 제시하였으며, 등전장 스케일링(constant field scaling) 이론으로 불린다.^[18] 스케일링 이론은, 무어의 법칙을 트랜지스터의 개수의 증가라는 단순한 법칙에서, 반도체칩의 성능(가격·연산 능력·저전력소비)에 대한 지수함수적인 발전 법칙으로 확장되어 그 이론적인 토대를 제공하였다. 지난 50년간 무어의 법칙은 컴퓨터, 인터넷 및 SNS로 대표되는 디지털 혁명의 원동력이 되어왔다.

실리콘 산업을 개척한 기초 과학기술들

1. 다양한 전공자들의 기초 기술 개발

쇼클리 랩과 페어차일드 반도체의 연구원들은 트랜지스터 사업의 성공을 위하여 바닥에서부터 기본 기술을 개척해야 했다. 쇼클리가 화학 분야와 재료공학 분야 전공자를 채용하기 위하여 지역신문에 낸 광고에서도 기초연구(basic research)와 그 발표의 기회를 강조한 것은 주목할 만하다.^[19] 페어차일드 반도체사의 초창기에는 반도체 장비 및 재료회사들도 전무하던 시절이었다. 페어차일드의 연구원들은 IBM으로부터 주문 받은 트랜지스터의 스펙을 맞추기 위하여 각자 역할을 분담하여 개발하게 되는데, 로버츠는 실리콘 잉곳을 키우는 공정, 무어와 호어니는 확산 공정, 노이스와 래스트는 사진공정, 유일한 전자공학 전공자인 그리니치는 테스트 공정을 맡았다. 기계공학 전공의 클라이너와 기계기술사 출신의 블랭크는 함께 반도체 생산공장 즉, 팹 운영을 담당하였으며, 패키지 공정도 관리하였다. 당시 반도체 제조장비 회사도 전무하던 시절에 이들은 바닥에서부터 장비를 구축해야 했다. 무어는 확산 공정을 구현하기 위하여 퍼니스를 직접 제작하기도 하였다. 노이스는 샌프란시스코의 사진가게에서 카메라 장비와 렌즈를 구매하여 광학분야로 학사학위를 받고 코닥사에서 일한 경험을 갖고 있었던 래스트와 함께 사진공정의 정밀도를 고도화시킨다.^[20]

2. 기초 연구와 첨단 기술의 정립

쇼클리 랩과 페어차일드 반도체사의 연구원들이 실리콘 반도체 공정의 기초 기술을 정립할 때 기초 연구에 집중한 점은 주목할 만하다. 표 1에서 보는 바와 같이, 쇼클리 반도체와 페어차일드 소속의 연구원들이 발표한 초창기 논문을 보면 지금은 반도체 교과서에 나오는 기본적인 소자물리, 공정 이론들을 설명하고 있다.

그 중에 대표적인 것이 훗날 인텔의 CEO로 유명한 화학공학 전공의 앤디 그로브(Andy Grove)가 B. E. Deal과 정립한 'Deal-Grove model'로, 기체의 확산법칙(Fick's law)을 적용하여 반도체 산화공정을 설명하는 완벽한 이론을 제시하였다.

REFERENCES

- [17] G. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits", *Electronics* 38(8), April 19 (1965).
- [18] R. Dennard *et al.*, *IEEE J. Solid-State Circuits* 9, 256 (1974).
- [19] Arnold Thackray, David C. Brock and Rachel Jones, *Moore's Law* (Basic Books, 2015), p. 135.
- [20] Leslie Berlin, *The man Behind the microchip* (Oxford University Press, 2005), p. 94.

Table 1. Top research papers by Shockley lab. or Fairchild semiconductor, citation number from “google scholar”. (2017.09.)

연도	Author	저널	제목	인용
1965	BE Deal, AS Grove	J. Appl. Phys.	General relationship for the thermal oxidation of silicon	3563
1957	CT Sah, RN Noyce, W Shockley	Proc. IRE	Carrier generation and recombination in pn junctions and pn junction characteristics	2419
1969	M Lenzlinger, EH Snow	J. Appl. Phys.	Fowler-Nordheim tunneling into thermally grown SiO ₂	1712
1965	AS Grove, BE Deal, EH Snow, CT Sah	Solid-State Electronics	Investigation of thermally oxidised silicon surfaces using metal-oxide-semiconductor structures	478
1964	AS Grove, O Leistiko Jr, CT Sah	J. Appl. Phys.	Redistribution of acceptor and donor impurities during thermal oxidation of silicon	409

Fig. 6. Fairchild Semiconductor published a thermal oxidation theory called 'Deal-Grove Model'. Andy S. Grove (co-author), who later became CEO of Intel corporation, joined Fairchild semiconductor in 1963, shortly after completing Ph.D at UC Berkeley. Reprinted from B.E. Deal, A. S. Grove, "General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon", J. Appl. Phys. 36. 3770, with the permission of AIP Publishing.

3. SiO₂로 실리콘 표면을 정복하여 실리콘 산업을 일으키다

1950년대 후반의 반도체 산업계는 게르마늄(Germanium)의 표면에 대한 주목할 만한 과학기술적 성과에도 불구하고 낮은 신뢰성과 불안정성으로 반도체 소자로는 적합하지 않다고 생각하였고 실리콘으로 관심을 이동하게 된다.^[21] 그러나 실리콘의 경우도 표면상태(surface states)에 취약하여 난제가 있었다. 특히 당시 접합 트랜지스터의 노출된 p-n 접합면(특히 컬렉터와 베이스의 접합면)의 경우 끊어진 결합(dangling bond) 등의 결함에 의하여 다량의 표면상태가 제조 후에도 유발될 수 있고 이는 캐리어의 이동도를 낮추게 되는 것은 물론 특히 역방향 누설 전류에 의한 신뢰성이 문제였다. 애초에 반도체의 표면상태(surface states)의 개념을 제시한 것은 쇼클리였으며,^[22] 쇼클리 랩 출신이며 페어차일드 반도체社에 합류하는 C. T. Sah 등은 표면상태에서 매개된 재결합이 트랜지스터의 전류에 미치는 영향을 주목하게 되었다.^[23]

실리콘 반도체의 초창기 산업화의 궤적을 조망하면, 그 핵심

적 맥락은 표면 상태에 취약한 실리콘 표면을 산화막으로 정복하는 과정으로 이해할 수 있으며, 그 핵심적 기술은 호어니의 플레너 공정이다. 실리콘 표면의 원자의 개수는 $6.78 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 이나, 현대의 최첨단 산화공정 기술로 형성된 SiO₂는 그 Si-SiO₂ 계면의 표면상태의 개수를 $\sim 10^9/\text{cm}^2$ 이하로 조절할 수 있다. 또한, 'Deal-Grove model'은 SiO₂를 형성하는 산화공정을 이론적으로 설명하는 이론이며 C. T. Sah 등은 표면상태에 의한 전기적 특성의 열화과정을 규명하게 된다. 페어차일드의 8명의 창업자들은 당대 최고의 응용물리학자인 쇼클리 문하생이었던 만큼, 쇼클리 랩에서 쇼클리의 지도 아래 이루어진 기초 연구 활동은 실리콘밸리 탄생에 있어 재평가를 받아야 할 부분이다.

노이스와 실리콘밸리의 수평적 조직문화

실리콘 밸리의 수평적 조직문화와 자율적 연구의 풍토도 이들의 개척한 결과물로서 특히 노이스가 핵심적 역할을 했다. 페어차일드 회사의 설립 초기부터 벤처캐피탈 투자자인 아서 락과 다른 동료들로부터 노이스는 신생회사의 총괄 관리자의 역할을 주문받았으며 그는 이에 대한 탁월한 재능과 매력을 가지고 있었다. 노이스는 신생회사를 공동연구의 협업 공간으로 생각하고 회사를 이끌어갔다. 노이스는 계층구조적 문화를 싫어했고, 회사의 지위 및 입사시기와 관련 없이 누구든지 가능성의 존재로서 동일하게 생각하였다.

노이스는 쇼클리랩에서 일하던 1956년 8월 14일 "negative resistance diode" 아이디어에 대한 개념을 연구노트에 작성하고 보스인 쇼클리에게 설명하였으나, 쇼클리는 별 흥미를 두지

REFERENCES

- [21] Harry C. Gatos, Surf. Sci. **299/300**, 1 (1994).
- [22] W. Shockley, Phys. Rev. **56**, 317 (1939).
- [23] C. T. Sah, IRE. Tran. Electron Devices **9**, 94 (1962).

Fig. 7. (a) Noyce's lab notebook shows that he had been thinking about the Esaki diode(tunnel diode), but Shockley shows no interest, which demotivated Noyce from further research. ©2005 IEEE. Reprinted, with permission, from "Robert Noyce and the tunnel diode", IEEE Spectrum, May 2005, p. 49; (b) When heard of Hoff's concept of 'programmable calculator', Noyce gave him permission to keep working on the concept, and it developed into Microprocessor invention. Photography by Charles O'Rear. <https://flic.kr/p/bRcCs> (CC BY-NC-SA 2.0).

않아 아이디어를 포기하였다.^[24] 쇼클리 그의 직원이 자기에 게 어떤 아이디어, 제안 또는 계획을 이야기하는 것을 싫어했다. 노이스가 연구노트에 기록한 지 17개월이 지난 1958년 1월 15일 예사키(Esaki)는 노이스와 똑같은 개념의 다이오드를 발표하고 1973년 노벨상을 공동으로 수상한다. 이는 1971년 인텔의 CEO였던 노이스가 칩 설계직원 테드 호프(Ted Hoff)의 아이디어에 적극적으로 호응하여 '마이크로프로세서 발명'을 이끌어내는 과정과 대비된다. 호프는 1969년 비지컴이라는 일본 기업의 탁상용 계산기를 기획 중이었는데 프로젝트의 목표를 달성하기가 매우 힘들었다. 이를 타개할 목적으로 제시한 아이디어는 "프로그래밍된 명령어를 수행하는 마이크로프로세서"이고 노이스의 적극적인 후원에 힘입어 최초의 마이크로프로세서의 발명과 제품출시로 이어지게 된다.^[25]

맺음말

현재의 실리콘밸리가 팔로 앨토에 위치하게 된 것은 쇼클리의 개인적인 이유 때문이지만 첨단기술과 혁신의 산실을 상징하게 된 것은 쇼클리 랩을 떠난 젊은 과학기술자들이 설립한 페어차일드 반도체社에서 이룩한 혁신 기술들 덕택이다.

햇병아리 중소기업에 불과한 이들이 동부의 벨연구소와 대기업들을 제치고 성공할 수 있었던 이유는 무엇일까?

첫째는 소속 연구원의 전문 분야의 다양성이다. 페어차일드 반도체社의 창업자들은 이론물리학자, 화학자, 기계공학자, 전자계측전문가, 광학전문가 등 다방면의 전문가였으며 이들은 서로 보완과 협동으로 시대를 이끌어가는 혁신적 기술을 융합·인태할 수 있었다.

둘째는 기초 과학기술에 충실한 연구개발을 진행했다는 점이다. 기본에 충실한 연구를 통하여 혁신 기술이 탄생할 수 있었으며, 이들이 확립한 기초 과학기술 성과는 실리콘 산업의 탄탄한 토대를 제공하였다.

셋째는 젊은 연구원들 사이의 강한 유대감과 그로 인한 협력관계이다. 이는 쇼클리 랩을 떠나기 위해서 자신들 모두를 채용할 회사를 찾을 때 장점으로 호소한 점이기도 하였다.^[26]

위의 세 가지 이유 모두 쇼클리로부터 연유하고, 그 핵심 축에는 노이스가 있었다.

젊은 연구원이 떠난 후 비록 쇼클리는 스탠퍼드의 교수직을 수락했지만, 벨연구소를 떠나 캘리포니아로 온 것은 자기 자신만의 꿈을 이루기 위한 도전이었다. 노이스 또한 MIT 졸업시 IBM과 벨연구소에서 받은 연구직 제안을 거절하고 갓 트랜지스터 사업을 시작한 회사인 필코(Philco)에 취직하는데, 유명하고 안정적인 연구소보다 조그마한 회사에서 시작해야 자기에게 보다 기회가 많을 것이라 생각했기 때문이다.^[27] 창업 생태계의 활성화에 있어서, 쇼클리와 노이스의 이러한 도전정신을 이야기하는 것은 당연하다. 그러나 이를 강조하기 전에 이를 뒷받침해주는 사회적 풍토 또는 제도적 여건을 먼저 살펴볼 필요가 있다.

REFERENCES

- [24] Leslie Berlin, *The man Behind the microchip* (Oxford University Press, 2005). p.66.
- [25] Walter Isaacson, *The Innovators: How a Group of Hackers, Geniuses, and Geeks Created the Digital Revolution* (Simon and Schuster, 2014), p. 196-199.
- [26] "...the horizontal ties in the group are strong..." in the proposal letter, Leslie Berlin, *The man Behind the microchip* (Oxford University Press, 2005), p. 79.
- [27] Leslie Berlin, *The man Behind the microchip* (Oxford University Press, 2005), p. 42.