

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 1 日現在

機関番号：32621

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23653089

研究課題名（和文） LSI と MEMS の融合研究と日本における半導体産業政策の失敗学

研究課題名（英文） A case study of Japanese Government's Semiconductor Policy: LSI, MEMS, and Blue Emitting Diode

研究代表者

上山隆大 (UEYAMA TAKAHIRO)

上智大学・経済学部・教授

研究者番号：10193848

研究成果の概要（和文）：本研究は、研究代表者がここ数年取り組んできたシリコンバレー研究から派生した、次の大きなプロジェクトのフェージビリティ・スタディーズである。本研究の柱は二つある。第一は、現在の半導体技術の最先端の競争現場である「LSI と MEMS の融合」の実態をインタビューや内部調査をもとに検証すること、第二は、日本の半導体産業育成に関する過去の事例として、「青色発光ダイオード開発」のケースを分析することである。

研究成果の概要（英文）：This is a feasibility study of my next project which aims to explore the policy failure of Japanese Government regarding Science and Technology Policies from the 1960s to the present. In particular I am interested in why Japan failed to keep its competitiveness in the filed of LSI and Electronics. In this study, I did some research concerning the integration of LSI and MEMS (micro-electrical mechanical system), and a case study of the Gallium Nitride and Blue Light Emitting Diode.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,100,000	330,000	1,430,000

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：経済学・経済史

キーワード：科学技術政策、イノベーション、半導体、LSI、青色発光ダイオード

1. 研究開始当初の背景

本研究は、研究代表者が東北大学工学研究科、江刺正義教授が主宰する研究プロジェクト「先端融合開発拠点」における「技術社会システムグループ」の代表者として参加したことから始まった。

そのプロジェクトの社会研究部門のまとめ役として LSI 研究の拠点の 1 つである東北大学の内部からその研究実態を自らの目で見える機会を与えられた。それは 1970 年代に日本のエレクトロニクス・半導体産業が世界のマーケットを席卷し、その後に韓国、台湾、中国といった他の国々の研究者によって激しく追い上げられている実態を実感するきっかけとなったのである。特に、VLSI と MEMS (micro-electrical mechanical system) の

融合へと向かいつつある世界の素材産業分野において、日本が著しくその競争力を失いつつあるという実態であった。

1970 年代までの日本の産業政策は明らかに半導体エレクトロニクスの分野での優位を作り出すのに成功していた。しかし 1980 年代に入るとともに諸外国の激しい追い上げによってその有意性が失われてきたのである。

振り返れば、80 年代の半ばには日本の半導体は世界シェアの 50% を占めるまでに成長し、コンピュータに不可欠の半導体メモリ (DRAM) では実に 80% のシェアを確保していた。それが、SEMATECH をはじめとしたアメリカの産学連携プロジェクトや韓国・台湾の国家レベルでの産業政策の追い上げを受

けて、90年代後半には半導体世界シェアは20%を切るまでに衰退したのである。

なぜ世界でも最も進んだ技術を持っている日本の半導体がグローバルな競争に負けてしまうのか？大学と産業界の連携の拙さか？産業政策の失敗か？他になにかシステムティックな要因はあるのだろうか？このようなことを考える中で、なぜ日本が1980年代から90年代にかけて急速に半導体LSIの分野で競争力を失っていたのかという疑問を「日本の産業政策の失敗学」と位置付けて研究したいと考えるようになった。

2. 研究の目的

本研究は、研究代表者がここ数年取り組んできたシリコンバレー研究から派生した、次の大きなプロジェクトのフィージビリティ・スタディーズである。本研究は、トランジスタからIC (integrated circuit)、LSI (large scale integration) さらにはVLSI (超LSI) に至る日本のエレクトロニクス・半導体産業の過去50年間の歴史を「日本の産業政策の失敗学」と位置づけて、90年代以降のグローバルマーケットからの敗退をアカデミックなレベルで捉え直し、さらVLSIとMEMS (micro-electrical mechanical system) の融合へと向かいつつある世界の素材産業拠点と日本の拠点との比較研究を通して、日本の大学研究と企業の共同研究の成功の可能性とそれを導くための産業政策のあるべき姿を模索する。

本研究の柱は二つある。第一は、現在の半導体技術の最先端の競争現場である「LSIとMEMS (micro-electrical mechanical system) の融合」の実態を、インタビューや内部調査をもとに検証することである。この分野の生き残り競争は現在、微小機械技術の集積であるMEMS技術を用いて幾枚ものLSIを積み上げる「三次元実装」によって、極端に値崩れしてしまったLSIを飛躍的に高度化し高付加価値化するULSI (ultra-large LSI) へ向かっている。世界の大学研究者や企業研究者がこの開発で現在のしを削っている。この分野の正確な理解のために、文献調査と東北大学やUC Berkeleyの拠点調査を行いたい。

本研究の第二の柱は、トランジスタに始まり、ICそしてLSI (large scale integration) さらにはVLSI (超LSI) に至る日本のエレクトロニクス素材産業の過去50年間の歴史を「日本の産業政策の失敗学」という新しい視点で捉え直すことである。その過程で、日本の半導体産業育成に関する過去の事例を一つ取り上げ、それについてのケーススタディーを行なうことである。日本の半導体技術の創成期に旧通産省が果たした役割を追って行くうちに、その成功と失敗の両面を持つ「青色発光ダイオード開発」のケースに着目

し、UC BerkeleyのChristophe Lecuyer氏との共同研究に入った。

3. 研究の方法

本研究は挑戦的萌芽研究であるため、研究の力点を日本の半導体・エレクトロニクス関係の歴史的背景を理解することから始めた。かなりの数の文献をサーベイし、この分野における基礎文献調査を最初の年度に終えることができた。

次にサンフランシスコ周辺のシリコンバレーにおける実地調査を行った。この地域における半導体エレクトロニクスの拠点としてIC研究所がある。これは1980年代に日本の半導体の急速な追い上げを受けて、ナショナル・サイエンス・ファウンデーションが国家プロジェクトの一つとして大学にサイエンス・アンド・テクノロジーセンターをつくり、その資金を得て大学と産業界との連携をIC分野によってはかろうとした拠点の一つである。スタンフォード大学のアーカイブに残るこの研究所の資料を調査し1980年代からアメリカの半導体分野における国家的な日本追撃のプロセスが始まったことを確認した。さらにUCバークレーにおいて、BSAC (Berkeley Sensor and Actuator Center) の研究所の実地調査を行った。本研究で行ったインタビューの対象者は以下のとおりである。

(1-3)カリフォルニア大学バークレー校 John Huggins 教授、Albert Pisano 教授、Richard Mullerk 教授

(4) バークレー技術移転局のディレクター、Michel Cohen 氏

(5-6) スタンフォード大学 Robert Byer 教授、Roger Howe 教授

(4)マサチューセッツ工科大学 産学連携センターのディレクター、John Schmitt 教授

(7) James Tietjen

(8) Herbert Marusca

(9) 赤崎勇 (名古屋大学名誉教授)

(10) 天野浩 (名古屋大学教授)

(11) 太田光一 (豊田合成株式会社監査役)

4. 研究成果

本研究では、日本における失敗学の1つのケースとして、UCバークレーのクリストフ・ルクイエー氏と共にこの分野の成功と失敗の両面を示している青色発光ダイオードの歴史的研究を行った。青色発光ダイオードはスタンフォード大学のマルスカとパンコフが始めたガリウムを素材として用いた青色形成の試みであったが、その当時世界のどの研究者も研究素材の対象としてガリウム研究の対象から離れジンクセレンを素材と

する研究へと移っていった。その中で名古屋大学の赤崎勇および天野浩は一貫してガリウムを用いた半導体発光のプロセスを研究し 1980 年代になって初めてその実用化に成功している。従来青色発光ダイオードは日亜化学工業に属していた中村修二（現 UC サンタバーバラ教授）によって初めてガリウムを用いた青色発光の実現に成功したと言われている。しかしながら 1960 年代にまで遡るガリウム素材研究の歴史をつぶさに調査し、アメリカ側と日本側の研究者、すなわちティエトジェンとマルスカというアメリカ側の研究者および赤崎勇、天野浩、トヨタ合成の太田光一へのインタビュー調査を通して、これまでの中村修二による完全な基礎研究の成功というストーリーでは説明しきれないものがあることを明らかにした。すなわち、赤崎勇のグループは長年のガリウム研究を通して、これが P 型および N 型を作るための極めて純度の高い結晶を生成することに成功し、さらにはその P-N 型の結晶化に成功することによって、青色発光ダイオードの基礎的な理論とその実験をすでに 1980 年代の後半に終えていたのである。

中村修二はこの基礎研究に基づいて、それを商業化することに成功したというのが実情であろう。赤崎たちによって実現されていた青色発光の過程は最終的に不純物として交っている水素を除去するプロセスが極めて複雑でありコストのかかるものであったが、中村修二はこれを単純な熱処理によって解決することを実現したのである。それによって日亜化学は数々の特許を取得しこの分野の有意性を確立することができた。

しかしながらその基礎研究のほとんどは、日本の大学においてすでに確立されていたこと、しかしそれを産業化するプロセスにおいて大学の研究室では幾多の困難が存在したこと、そのことが半導体分野における 1980 年代の輝かしい成果を実際の産学連携のプロセスに落とし込むことを難しくしていたのである。

いわばここにエレクトロニクス・半導体における日本の産業政策、科学技術政策の失敗のケースを見出すことができる。このケースを丹念に調べることによって、本研究である日本の産業政策の失敗学の 1 つの重要な事例を明らかにし得たと考えている。

2 年間に於いて、半導体 LSI 超 LSI における基礎的文獻とその背景を調査し、その 1 つのケースにまで辿り着けたことは挑戦的萌芽の範囲を超えて、具体的な論文へと結実することができたのだと考えている。

ルクイエー氏と共に調査した青色発光ダイオードのケースは海外の 3 つの学会において報告し、また、カリフォルニア大学から発行されている自然科学史の最も有名な論文

誌の 1 つである *Historical Studies in Natural Science* に論文を 2012 年に投稿し、査読された結果 2013 年の 1 月に受理され 2013 年の秋に活字になることが決まっている。この間に行った研究成果の主な発表論文及び学会発表は以下の通りである。またここにはこの萌芽研究と直接関わってはいないが、上山隆大がこの研究に到達するまでに行った研究に基づき発表された図書その他の論文の数も下記の欄に記してある。下は、この研究成果の一つである論文の研究要旨である。

The Logics of Material Innovation: The Case of Gallium Nitride and Blue Light Emitting Diode

Christophe Lécuyer and Takahiro Ueyama

How did gallium nitride become a critical semiconductor material? What were the forces that presided over its creation and made its rise possible? In his book *Brilliant: Shuji Nakamura and the Revolution of Solid State Lighting*, Bob Johnstone pointed to the role of Nakamura, a Japanese engineer, in the development of gallium nitride crystals and the making of blue and white LEDs (it is important to note here that gallium nitride and blue LEDs are inextricably linked. Improvements in gallium nitride crystals lead to improvements in light emission). According to Johnstone, Nakamura almost single-handedly created gallium nitride crystals and blue LED technology at Nichia Chemical Industries, a medium-sized chemical firm based in Japan.

Closer attention to the historical record reveals a much more complex and interesting story. Nakamura was not the only innovator of gallium nitride and blue LED technology – far from it. Others such as Herbert Maruska and Jacques Pankove at RCA and Isamu Akasaki and Hiroshi Amano at Nagoya University played critical roles as well. As a matter of fact, Nakamura's main contribution to gallium nitride technology came from his commercialization of materials and material practices originally created by Maruska and Akasaki. It is interesting to note as well that Nakamura and his collaborators at Nichia were not the only ones to introduce gallium nitride to the market. A group of engineers at Toyoda Gosei, another Japanese firm, commercialized gallium nitride and blue LEDs around the same time and in direct competition with Nakamura and Nichia Chemical.

Thus the story of gallium nitride opens a window into the study of technology transfer and university-industry relations. The contextual

challenges are the following: the materiality of substances, tools, and fabrication techniques (which we refer to as “material logic”); the needs, demands, and interests of intended customers (which we call “market logic”); and finally the competitive tensions among laboratories, firms, and nations (namely “competitive logic”).

The development of gallium nitride was shaped by the interplay of these three contextual logics. Material logic was especially prevalent as chemists, physicists, and electrical engineers struggled for decades to create gallium nitride crystals and improve their electronic and light emitting properties. To transform gallium nitride into a material useful for the manufacture of LEDs, they relied on the full armentarium of semiconductor technologists: epitaxial reactors, ion implanters, high temperature ovens, and techniques such as the deposition of different crystalline layers on the same crystal substrate. Engineers and scientists at RCA, Nagoya University, Toyoda Gosei, and Nichia Chemical struggled with the material logic imposed by gallium nitride to meet the needs of potential markets. Remarkably, these intended markets changed very little over this forty year period. Since the late 1960s, technologists saw a market for gallium nitride-based blue LEDs in LED-based displays, such as flat panel televisions. From the start, they were also interested in producing LEDs for the illumination market. As new types of communication and consumer electronic devices emerged, gallium nitride technologists identified other markets for their diodes such as cell phones and blue lasers employed in compact disks. It was this market logic that drove research on gallium nitride for nearly three decades before the material was commercialized in the mid-1990s.

Competitive logic also shaped the development of gallium nitride, mostly in the early days of the material and again in the late 1980s and 1990s, when Toyoda Gosei and Nichia Chemical competed to bring gallium nitride and blue LEDs to the market. Fierce competition between these firms led to the development of stable production processes and the constant improvement of gallium nitride crystals and blue LEDs. Also important for the development of gallium nitride was competition in semiconductors between Japan and the United States, each trying to dominate global markets for silicon microchips and compound semiconductors.

The development of gallium nitride was as much about failures and dead-ends, as it was about successful innovation. It occurred in

three phases. In the first phase, starting in 1968, Herbert Maruska and other researchers at RCA created the first single crystals of gallium nitride, in order to produce blue LEDs for flat panel televisions. To grow these crystals, Maruska used a new technique developed at RCA: HVPE or hydride vapor phase epitaxy (epitaxy was the process whereby one grew a crystalline layer on top of another crystal; HVPE was a chemical form of epitaxy relying on the use of hydrogen compounds). Maruska also employed sapphire crystals – which had been engineered to make silicon microchips for space and military applications – as the substrate on which to grow films of gallium nitride. Much of the funding for this project came from NASA. With the gallium nitride crystals he had fabricated, Maruska and his colleagues at RCA made relatively simple MIS LEDs (these LEDs relied on an N-type crystal layer and a film of insulating gallium nitride to produce light). These LEDs were very dim.

But the group at RCA soon encountered major obstacles in fabricating a brighter form of LEDs, PN junction LEDs, with gallium nitride crystals. PN junction LEDs were made of a sandwich of P-type and N-type crystal layers. P-type layers were characterized by an excess of electron deficiencies, whereas N-type layers had an oversupply of electrons. Gallium nitride came naturally as N-type. But the group could not make P-type gallium nitride. In the late 1960s and early 1970s, Maruska, who had developed a deep emotional attachment to the material he had created, systematically looked for the right P-type dopant to create P-type gallium nitride. He sought to dope gallium nitride with zinc, magnesium, cadmium, and mercury - without success. Maruska and his colleagues had run into a major problem with the material logic that would plague researchers aiming at making blue LEDs for the next twenty years. These persistent difficulties and competitive logic in the form of a financial crisis at RCA brought about by Japanese competition in consumer electronics persuaded the lab’s managers to terminate the project and to lay off Maruska in 1974.

At that time, the locus of innovation in gallium nitride crystals shifted to Japan. Isamu Akasaki pursued the further development of the material at the Matsushita Research Institute and Nagoya University in the 1970s and 1980s. Akasaki was an applied physicist who had developed a fascination for luminescent materials when he had worked on television technology at Fujitsu in the late 1950s. At Matsushita, Akasaki grappled with the material logic of gallium

nitride. He reproduced Maruska's work, including his HVPE reactor. He later added new elements to the material logic in order to fabricate bright PN junction LEDs. These new elements added to the material logic were MBE (molecular beam epitaxy), a physical process for growing crystals, and ion implantation, a technique for shooting dopants into semiconductor crystals. This work was funded by MITI, the Japanese ministry of international trade and industry, which saw compound semiconductors as an area of strategic importance for Japanese industry. After several years of work, Akasaki became convinced that MBE would not allow the production of better crystals than HVPE and that one could not make P-type gallium nitride with ion implantation. The material logic of gallium nitride remained as intractable as ever.

After joining Nagoya University in 1981, Akasaki made several technological breakthroughs in collaboration with his doctoral student Hiroshi Amano. Key for these breakthroughs was their turn to yet another crystal-growing technique, MOCVD. MOCVD, or metal organic chemical vapor deposition, was a chemical form of epitaxy and as such was closely related to HVPE. This new epitaxial technique enabled Akasaki and Amano to grow a layer of aluminium nitride between the sapphire substrate and the gallium nitride film. This layer acted as a buffer and enabled the production of crystals with fewer defects than crystals fabricated with other growing techniques. Amano and Akasaki also found a way to make P-type gallium nitride by shooting electron beams onto gallium nitride crystals and by doping them with magnesium. These revolutionary techniques enabled Akasaki's group to fabricate the first blue PN junction LEDs in 1989. These LEDs were two orders of magnitude brighter than MIS LEDs.

In the third phase of the development of gallium nitride, two Japanese firms commercialized Akasaki and Amano's research. These firms were Toyoda Gosei, a Toyota subsidiary manufacturing tires, and Nichia Chemical Industries, a chemical firm that produced phosphors for color televisions. These firms, which were new to the LED business, approached the commercialization of gallium nitride and blue LEDs in very different ways. Toyoda Gosei's engineers collaborated closely with Akasaki and Amano and obtained financing from an agency of the Japanese government to finance technology transfer from Nagoya University. They also made conservative

technical choices. They were interested for example in using Akasaki's new crystal growing techniques to make MIS LEDs (the type of LEDs which had been fabricated at RCA in the early 1970s).

In contrast, Shuji Nakamura and his group at Nichia Chemical aggressively appropriated the techniques developed by Akasaki and his group – without any formal agreement with the university and in direct competition with it and its corporate partner. The engineering group at Nichia was also more aggressive technically and concentrated from the start on the mass production of PN junction LEDs. The group at Nichia perfected the design of MOCVD reactors and engineered a low cost process for making P-type gallium nitride. These innovations enabled them to introduce blue PN junction LEDs to the market in 1993.

Several lessons can be drawn from this examination of gallium nitride for the understanding of materials innovation. First, materials innovation is a lengthy process. It was particularly long and protracted in the case of gallium nitride. The development of single crystals of gallium nitride took nearly four decades from Maruska's early work in the late 1960s to the worldwide production of gallium nitride-based LEDs in the first decade of the twenty first century.

Second, the engineering of new materials has an emotional dimension. Along with market logic, the emotional attachment and fascination of a few scientists and engineers for gallium nitride helped sustain the development of this material over the first twenty-five years of its existence. Maruska felt a deep bond to gallium nitride. Akasaki and Amano were fascinated by luminescent crystals and, according to a close associate, Nakamura "fell in love" with the material. The importance of emotional commitments in the history of gallium nitride is not specific to this material. Similar phenomena occurred in the creation of other materials as well. For example, in the early history of semiconductors Gordon Teal, a metallurgist working at the Bell Telephone Laboratories, developed what he called a "sentimental attachment" to germanium. He created the first single crystals of germanium which permitted the fabrication of junction transistors and enabled the early growth of the semiconductor industry.

Third, the history of gallium nitride shows the role of the constant interplay among several contextual logics – material logic, market logic, and competitive logic – in materials innovation. The history of gallium nitride is to a

large degree a story about Maruska, Akasaki, and Nakamura's contention with material logic. Along with the innovators' emotional attachment to the material, it was market logic that carried the development of gallium nitride across the whole period. Competitive logic also shaped gallium nitride technology. For example, the war waged by Nichia Chemical and Toyoda Gosei accelerated material advancements. It led to the fabrication of increasingly brighter blue LEDs and to the engineering of white, green, and violet light emitting diodes as well.

The development of gallium nitride was, in some ways, rather random and contingent. Individuals and groups moved in and out of gallium nitride research, partially on the basis of personal inclinations and partially because of the randomness of corporate politics. But beyond these personal preferences and the uncertainty of corporate and scientific life, larger patterns can be discerned. One of these regularities is the emotional power of materials which drew a small cadre of talented researchers to gallium nitride. Another regularity is the complex of challenges, constraints, and opportunities that scientists and engineers face in three contexts: materials, material competencies, and their obduracy; users and markets; and the competitive tensions among laboratories, firms, and nations. It is at the convergence point of the emotional spell of materials and these contextual logics that novel material configurations emerge, evolve, and find new uses and new users.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

① 上山隆大 「知識の探求における公益と私益」『アステイオン』「特集：科学を試す」サントリー文化財団、2013 年 5 月、査読なし。

② 上山隆大 「公益と私益をつなぐもの：民間資金と大学運営のダイナミズム」『シリーズ大学』第 3 巻所収、岩波書店、2013 年 5 月、査読なし。

③ 上山隆大 「同時代史研究という視座と科学技術政策」『研究・技術計画学会』vol. 28, no.1, 2013, pp. 査読あり。

④ 上山隆大 「私益と公益のはざま：イノベーションと知識生産における二つの秩序」上智大学経済学部 100 周年記念論文集、2013 年 3 月、査読なし。

⑤ Christophe Lecuyer and Takahiro Ueyama, "The Logics of Material Innovation: The Case of Gallium Nitride and Blue Light Emitting Diodes," with Christophe Lecuyer, *Historical Studies in the Natural Science*. Vol. 43, Number 3, pps. 243–280、査読あり

⑥ 上山隆大 「すべての大学人は市場の中で生きるしかない：アカデミアの戦略と大学財務の独立」『中央公論』2012 年 2 月号、pp.42-51、査読なし。

⑦ 上山隆大 「グローバル化時代におけるアカデミアの行方」『学士會会報』January, No.892 2012-1, 42-47、査読なし。

⑧ 上山隆大 「シリコンバレーの生成とアカデミック・アントレプレナーとしての研究大学」『企業家研究』vol. 8, 72-90, 2011、査読あり。

[学会発表] (計 3 件)

① Takahiro Ueyama and Christophe Lecuyer, "Is There A Logic to Material Innovation?: The Case of Gallium Nitride and Blue Light Emitting Diodes," with The Life of New Materials, Philadelphia Area Center for History of Science, 2011.11.11., USA

② Takahiro Ueyama and Christophe Lecuyer, "The Development of Gallium Nitride and Blue LEDs in the United States and Japan," with Christophe Lecuyer, Society for the History of Technology annual meeting, Copenhagen, 2011.10.12, Holland

③ 上山隆大 「Entrepreneurial University 概念の再検討：1980-90 年代のアカデミアと企業から見たシリコンバレー形成の一側面」政策研究大学院大学での招待報告。2011 年 5 月 31 日

[図書] (計 1 件)

① 上山隆大 『アカデミック・キャピタリズムを超えて：アメリカの大学と科学研究の現在』NTT 出版、2010 年 査読無し著書 (第 12 回 2011 年度 読売・吉野作造賞)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上山隆大 (UEYAMA TAKAHIRO)

上智大学・経済学部・教授

研究者番号：10193848