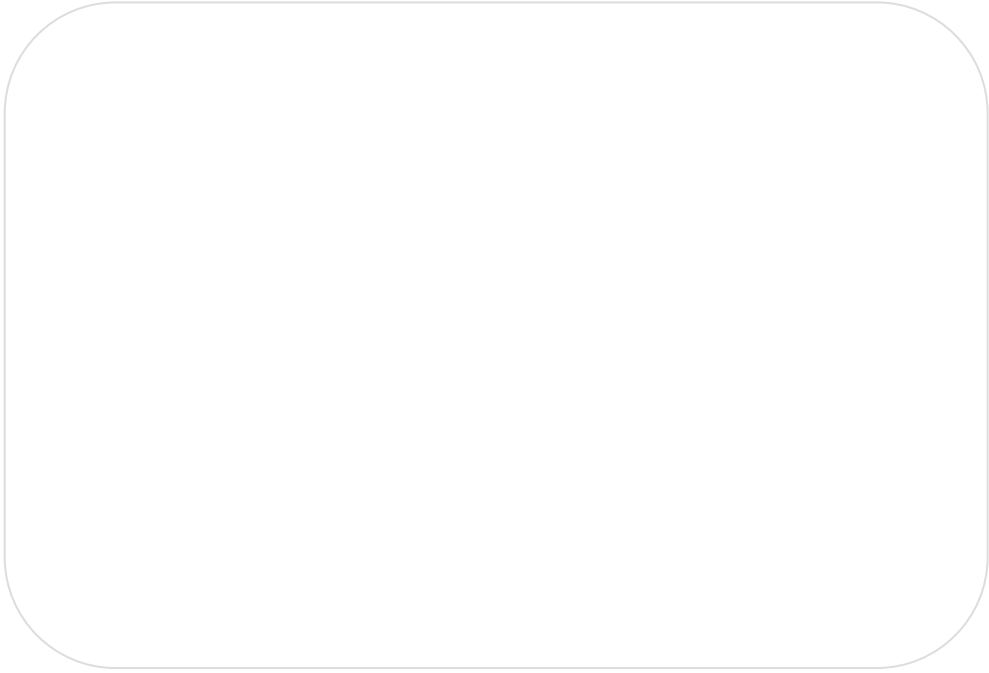




Hitotsubashi University
Institute of Innovation Research



一橋大学イノベーション研究センター

東京都国立市中2-1
<http://www.iir.hit-u.ac.jp>

『半導体 R&D システムのオープン化：F2 リソグラフィ事例に学ぶ』

東川 巖

一橋大学イノベーション研究センター 客員研究員¹

【Abstract】 Nikon、Canon 二社で 80%に達する 199 年代初頭の絶頂期から、国内半導体デバイスメーカーの凋落と時を一に国内半導体露光装置メーカー Nikon、Canon の地盤沈下が続いている。2002 年には着実にシェアを伸ばしてきた ASML 社がトップに躍り出た。露光装置はコンタクト露光に始まり、プロキシティ露光、1:1 ミラースキャンから縮小投影露光へ進み、縮小投影露光は g 線、i 線、KrF、ArF と短波長化し、Step&Repeat から Step&Scan に移行してきた。競争は過酷で次世代露光装置の開発に露光装置メーカーの命運がかかっている。2000 年前後には ArF 193 nm の次の技術が混沌としていた。ArF 193 nm に目途がついた 1950 年代後半、次世代リソグラフィの選択は、露光装置メーカーだけでなく半導体業界全体の問題でもあった。波長メリットが少ないとされた F2 157 nm は当初選択されず EPL に代表される電子線投影露光や EUVL と呼ばれる軟 X 線縮小投影露光が候補になっていた。しかし開発は進展せず F2 157 nm に軸を置かざるを得なくなった。本稿では露光装置メーカー、デバイスメーカー、コンソーシアムなどが、EPL、EUVL に代えて再浮上させた F2 157 nm リソグラフィ技術の選択、開発の遅延、ArF 193 nm 液浸リソグラフィ技術への急展開と集中、F2 157 nm リソグラフィの断念、ArF 193 nm 液浸リソグラフィの急成長、限界となる NA 1.35 装置の投入へと突き進んだ過程を追い、技術開発の方向を変えていく様、リソグラフィ技術の世代交代の過酷さ、更なる寡占化を生んだ選択と集中・成長サイクルの創出過程に垣間見られるオープンイノベーション戦略の優劣に迫る。

- 1 はじめに
- 2 半導体産業
 - 2.1 Moore's Law
 - 2.2 産業政策、標準化、ロードマップ活動
- 3 リソグラフィ技術開発の歴史
 - 3.1 コンタクト露光からダブルパターンニングへ
 - 3.2 SEMATECH、IMEC、ANT/CNSE

¹ [謝辞] 本稿は、一橋大学イノベーション研究センター科研費プロジェクト：「産学官連携によるイノベーション過程の研究」の成果である。執筆にあたっては、一橋大学イノベーション研究センター中馬宏之教授のご指導を頂きました。本稿を担当する機会を提供して頂いた一橋大学イノベーション研究センター、並びに中馬宏之教授に心から御礼申し上げます。

一橋大学イノベーション研究センター 東京都国立市中 2-1 <http://www.iir.hit-u.ac.jp>

- 4 F2 157 nm
 - 4.1 F2 157 nm の選択
 - 4.2 F2 157 nm 技術開発
 - 4.3 ArF 193 nm 液浸技術開発
 - 4.4 F2 157 nm の終息
 - 4.5 ASML 社の躍進 - 半導体装置メーカーの頂点へ -
- 5 失敗に終わった F2 157 nm
- 6 おわりに

1. はじめに

大戦後に米国で生まれた半導体技術は成長を続け、世界を変える産業に至っている。Fairchild、Texas Instruments、Bell 研に始まり、半導体製品は産業活動の根幹に組み込まれ、IBM、Intel が時代を造り、PC、携帯電話、スマートフォンが生まれ、Google、Apple が世界を変え、全世界にネットワークを構築し、地球上のどこからでもコミュニケーションが出来る時代を迎えている。デジタルという言葉が氾濫し、想像すらできなかった膨大なデジタルデータが安価に処理され、蓄えられ、デジタルカメラは汎用の銀塩写真を駆逐し、電力消費に占めるデジタル機器の比率は増え続けている。経済活動の根幹に浸透した半導体製品は、全ての産業を転換している。

資源に乏しい日本では輸出産業として半導体産業への期待が黎明期から大きい。韓国、台湾も同じ土俵に有り産業振興策が半導体産業の育成に寄与している。しかし日本の半導体産業の盛況は 80 年代に日米半導体摩擦を生んで終焉し、以後凋落の一途を辿っている。

Rank	1987			1997			2007			2011				
	Company	Country of	Revenue	Company	Country of	Revenue	Company	Country of	Revenue	Market	Company	Country of	Revenue	Market
			(million \$ USD)			(million \$ USD)			(million \$ USD)				(million \$ USD)	
1	NEC Semiconductors	Japan	3,368	Intel Corporation	USA	21,746	Intel Corporation	USA	33,995	14.8%	Intel Corporation(1)	USA	49,685	15.9%
2	Toshiba Semiconductor	Japan	3,029	NEC Semiconductors	Japan	10,222	Samsung Electronics	South Korea	19,691	6.9%	Samsung Electronics	South Korea	29,242	9.3%
3	Hitachi Semiconductors	Japan	2,618	Mobrola Semiconductors	USA	8,067	Texas Instruments	USA	12,275	5.5%	Texas Instruments(2)	USA	14,081	4.5%
4	Molrola Semiconductors	USA	2,434	Texas Instruments	USA	7,352	Toshiba Semiconductor	Japan	12,186	5.0%	Toshiba Semiconductor	Japan	13,362	4.3%
5	Texas Instruments	USA	2,127	Toshiba Semiconductor	Japan	7,253	STMicroelectronics	Francellaly	10,000	4.9%	Renesas Electronics	Japan	11,153	3.6%
6	Fujitsu Semiconductors	Japan	1,801	Hitachi Semiconductors	Japan	6,298	Hynix	South Korea	9,047	4.3%	Qualcomm(3)	USA	10,080	3.2%
7	Philips Semiconductors	Netherland	1,602	Samsung Semiconductor	South Korea	5,856	Renesas Technology	Japan	8,001	4.0%	STMicroelectronics	Francellaly	9,792	3.1%
8	National Semiconductor	USA	1,506	Philips Semiconductors	Netherland	4,440	Sony	Japan	7,974	3.0%	Hynix	South Korea	8,911	2.8%
9	Mitsubishi Semiconductor	Japan	1,492	Fujitsu Semiconductors	Japan	4,622	Infineon Technologies	Germany	6,201	3.1%	Micron Technology	USA	7,344	2.3%
10	Intel Corporation	USA	1,491	SGS-Thomson	Francellaly	4,019	AMD	USA	5,918	2.7%	Broadcom	USA	7,153	2.3%
										top 10 cumulative % 54.3%				top 10 cumulative % 51.3%

表 1 半導体企業トップテン (iSuppli²公開資料をもとに作成)

3.11 震災で壊滅的な被災となったルネサス那珂工場は、自動車産業界の支援を受けて短期の復旧を成し遂げたが、円高・ウォン安を始めとする環境の変化は国内デバイスメーカーの存亡に関わる事態に至りエルピーダは再生手続きに入り米マイクロン社の傘下に入り、パナソニック、ルネサス等は事業の縮小を図っている。現在 (2013) に至っては、ルネサスには金融機関に加えてマイコン製品等の顧客企業が資金導入を行う。さらに、富士通、パナソニック、ルネサス三社は、SoC 事業の再編を目指し、設計・開発の事業統合会社設

²iSuppli <http://www.isuppli.com/Pages/Home.aspx>

立を描いている。

デバイスメーカーだけではない。国内半導体装置メーカーの多くも競争の激化に加えて、国内デバイスメーカーの低迷、円高環境で苦戦している。半導体露光装置は Nikon、Canon が市場を制していた時代から ASML 社の時代に移り、2002 年には半導体露光装置メーカーのトップの座に至った。ASML 社は参入から着実にシェアを伸ばし、2005 年以降、特にリーマンショック以降は顕著な寡占化を成し遂げている。2011 年には装置価格の高騰、前工程におけるリソグラフィ設備投資の占有比率の増大が、ASML 社を全半導体装置メーカー売上高の頂点に押し上げている。1980 年代に頂点に立っていた Nikon は 1990 年代初めから低落傾向を示している。しかし、現在、状況はさらに激変している。2012 年に入ると ASML 社に Intel 社、TSMC 社、Samsung 社の資金が入った。開発投資 (ASML's Customer Co-Investment Program: 三社計 \$1.69 billion) だけでなく三社は株主になる。その規模は Intel 15%、TSMC 5%、Samsung 3% (三社計 \$4.76 billion) と大きい。

本稿では、国内デバイスメーカーの凋落と時を一に低落を示している国内半導体露光装置メーカーが 2000 年前後に取り組んだリソグラフィ技術開発に焦点を当てたい。1990 年代後半、ArF 193 nm リソグラフィの次の世代は EPL、EUVL で描かれていたが開発は遅延し、押しやられていた F2 157 nm リソグラフィが浮上した。その後短期間のうちに F2 157 nm は ArF 193 nm 液浸に開発の軸足が切り替えられていく。そこでは装置メーカーだけでなく IMEC、SEMATECH、さらに ITRS といった組織や、半導体業界トップに居続ける Intel 社、さらには TSMC 社が重要な役割を担った。短命とされていた F2 157 nm の延命策の検討に紛れていた ArF 193 nm 波長で純水という選択肢を見逃さなかった見識、ウエハの露光領域だけを純水で満たす Local Fill Concept、Local Fill Concept を支えた純水の表面張力、液滴を残さない撥水性が液浸露光リソグラフィを実現していった。しかし結果は ASML 社のさらなる寡占であった。Local Fill Concept を打ち出しても勝てなかった Nikon、液浸では全く出遅れを挽回できない Canon を生んだ。新たな露光装置プラットフォームの開発では覇者が代わる。成功を生んだ因子、失敗を生んだ因子に迫り世代交代の過酷さに学びたい³。

2. 半導体産業

2.1 Moore's Law

まず、Moore's Law に触れたい。世代交代という切り口で技術・産業・ビジネスの絵姿が鮮明になる。半導体産業とその成長を支えているリソグラフィ技術の特徴は Moore's Law でさらに整理し易い。技術のトレンドも良く説明され、ロードマップが語られる^{補足¹}。

Moore's Law は Gordon E. Moore 自身の 1965 年の予測が出発点である^[1]。10 年後 1975 年に見直している^[2]。1965 年の著書では 4 製品の集積度をプロットし、外挿したに過ぎない。パターン寸法を $\times 0.7$ して面積 $1/2$ で同等の集積度を得て、同一の面積に集積度 $\times 2$ を実現するトレンドを予測した。横軸を年とし、縦軸にチップに搭載される Tr 数を片対

³本文中では液浸を Immersion あるいは Wet と表記し、従来型を Dry と表記する場合がある。

数でプロットするとほぼ直線になる 2~3 年で倍増している定率増加モデルであり、過去 50 年に渡る半導体産業の有り様をよく示している経験則でありビジネスモデルである⁴。

Moore's Law の典型は Intel 社の製品に見られる(補足参照)。業界の雄 Intel 社は二年サイクルを刻み×0.7 を推し進めてきた。本稿で扱うリソグラフィ技術も新たなプラットフォームの導入を繰り返して Moore's Law に対応している。次世代製品技術には微細化を軸に、トランジスタ構造、メモリセル構造の革新、それを実現する新規材料、新規プロセスといった新たな要素が組み込まれる。新たな技術の導入無しでは次世代への移行は出来ない。新たな設備・工場投資が生まれる。デバイス開発に先行してリソグラフィの方針が必要となる為、既存技術の延命か、次世代技術への移行かの決断には大きなリスクが伴う。設備投資規模は大きく、また設計制約が伴う為、デバイス開発段階からの継続性も重視される。

Moore's Law で扱われるデバイスは Tr 数あるいは Bit 数で製品の仕様が代表される CPU/ASIC、DRAM、Flash といった Digital 処理、Digital Memory に関わるデバイスで、世代交代は集積度“n 倍”へのジャンプである。近年は CPU/ASIC で half node を刻む製品もあるが DRAM が典型である...→4k→16k→... →16G→...といった 2ⁿ 刻みでの世代交代が繰り返されている。Digital 処理では Bit 長 8、16、32、64 といった Data が扱われ、2ⁿ での世代交代は理にかなっている。Intel 社は CPU で二年サイクルを刻む。

2.2 産業政策、標準化、ロードマップ活動

半導体産業においては各国の産業政策の関与も大きな要素である。成功例として超 LSI 技術研究組合が挙げられる。1966 年から始まった工業技術院・大型プロジェクト、1975 年にスタートした電電公社(武蔵野電気通信研究所)・超 LSI 開発プロジェクトに続いて一年遅れて旧通産省が興したプロジェクトで、1976 年~1979 年の 4 年間の補助事業(超 LSI 技術研究組合)、1980 年~1982 年の 3 年間の独自事業、1983 年~1986 年の 4 年間の追加事業と続いた。超 LSI 技術研究組合の日本の半導体製造技術開発に果たした役割は大きく、日本の世界シェアを激増させ、日米半導体摩擦に至った。

日米半導体摩擦は日米半導体協定を生んだ。急激な日系メーカーの DRAM の対米輸出、シェアの拡大が生んだ状況は米国半導体メーカーのみならず米国の国防の観点での議論を伴い、1985 年の SIA⁵ 301 条提訴に始まり、1986.9~1991.7 第一次日米半導体協定、1991.8~1996.7 第二次日米半導体協定に至った。ArF 193 nm の工場導入、F2 157 nm 技術開発は半導体協定が終わり、WSC(1997~)が構築され、国際協調が模索された時期にあたる。DARPA から 2012 年に出ている米国 DARPA 側のレポートもいきさつを知る上で興味

⁴Gordon E. Moore 氏は Intel 社の創設者の一人で Intel 社の Homepage には Moore's Law に関する資料が纏めて掲載されている。

[HTTP://WWW.INTEL.CO.JP/CONTENT/WWW/JP/JA/SILICON-INNOVATIONS/MOORES-LAW-CONSUMER-TECHNOLOGY.HTML](http://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/silicon-innovations/moores-law-consumer-technology.html)

[HTTP://WWW.INTEL.COM/PRESSROOM/KITS/EVENTS/MOORES_LAW_40TH/](http://www.intel.com/pressroom/kits/events/moores_law_40th/)

[HTTP://WWW.TF.UNI-KIEL.DE/MATWIS/AMAT/SEMITECH_EN/KAP_5/BACKBONE/R5_3_1.PDF](http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semitech_en/kap_5/backbone/r5_3_1.pdf)

⁵ WSC (the World Semiconductor Council 世界半導体会議) 1997 年設立。現在は、米、日、欧、台、韓、中の業界団体が参加する。

深い⁶。

海外でも公的資金の投入は産業振興の基本施策である。超 LSI 技術研究組合の成果が著しかった為その後の SEMATECH 等の海外の研究開発体制に多大な影響を与えた。もっとも、その後 10 年越える空白を経て始まった ASPLA、Selete などのデバイスメーカーが主導した国内コンソーシアムが成功したとは言い難い。F2 157 nm 開発でも ASET-INOL を始めとして公的資金の活用が模索された。NEDO プロジェクトも個々の課題は成功裏に終わっているが意図していた半導体産業の振興に寄与したとは言えない。2000 年代に入りさらに凋落している。

半導体産業は、製品のみでなく製造技術に関わる装置・材料でも標準化が図られてきた点にも特徴がある。半導体産業の勃興期を経て多くの企業の参入がなされたが、当時のシリコンウエハは各社が自身で製造したりするほどバラバラであった。半導体需要の高まりとともに専業メーカーからの購入が拡大するとバラバラな規格では不都合が生じ始めた為、外形規格を始めとして標準化が図られた。その時 SEMI スタンダードが組織的に動き始めた。当初は 2 インチ 3 インチのウエハの規格を設定した。ウエハ、マスクといった材料の外形規格、物性値規格、さらにその数値を保証するための測定に関わる規格の開発から始まった。スタンダード活動は、さらにキャリアの規格などに広がり、時代の要請に伴ってその守備範囲を拡大した。標準化では 300mm ウエハの製造ラインに向けての活動が著名である。

300mm の標準化は 1994 年に、日系・海外の関連メーカーを巻き込んで始められた。日系では、JEIDA、JSNM、SIRIJ、EIAJ、SEAJ などの半導体関連 5 団体が協力して J300 を組織して 300mm 標準化を推進した。これに対して、海外では、米国 SEMATECH(SEmiconductor MAnufacturing TEChnology)などが中心となり、i300i⁷を組織した。200mm ウエハから 300mm ウエハへの移行は大口径化ウエハ導入のサイクルから次の重要な選択肢であったが、移行の為の開発コスト・製造ラインへの投資は膨大でリスクを伴うものであった。300mm 口径への移行にあたっては、新たにハンドリングの自動化など規格の開発が多くの領域で進められた。規格に至らないガイドラインの開発も活発になされた。開発の加速と開発投資の抑制、ひいては工場投資の抑制を狙い SEMATECH が戦略的に標準化を推し進め装置開発などを推進した。WSC の設立と共に 1997 年からは i300i と J300・Selete との情報交換が始まった⁸。i300i に対しては Selete が対抗軸となり JEITA J300 の組織化に至っていた。装置・材料メーカーが多く存在する日本は i300i、J300 の技術情報交換の場で、例によって圧力に屈しつつ、対応した。多くのガイドラインが纏められた。また標準化のプロセスは SEMI でなされた。意図されたように、将来技術の標準化作業では、企業の戦略の衝突と共に技術のベンチマークに伴う技術開示が生じた。独占禁止法

⁶ http://www.issues.org/28.3/van_atta.html

⁷ International 300 mm Initiative (I300I) is incorporated as a subsidiary of SEMATECH in November 1995.

⁸ I300I and J300, the Japanese-led 300 mm development effort, sign the Global Joint Guidance Agreement to identify the 300 mm standards requirements of global device makers (1997).

に触れないルールでなされる標準化であったが Intel 社など積極的に標準化を推し進める企業の存在は大きかった。300mm 標準化は結果的に多くの企業の盛衰に影響した。寡占化を生んだとも言われる。また、日本のデバイスメーカーが 300mm 工場投資で遅れ切った結果、シェアを低下させた一因とも言われている。半導体露光装置では積極的に 300mm 工場投資を行った韓国、台湾のデバイスメーカーに対するビジネスで成功した ASML 社の躍進が目立つ結果を生んだ。この間、1998 年には、SEMATECH は International SEMATECH へと変貌し、マイクロリソグラフィ、ESH のプログラムを立ち上げた⁹。1999 年頃からは、Workshop や Symposium を立ち上げ技術交流の場を設けて技術開発を取り仕切ることを狙った。

半導体業界の研究開発の構図の理解の為には ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors) ロードマップ活動にも言及する必要がある。ITRS の前身は NTRS(National Technology Roadmap for Semiconductors)で、米国の組織活動であった。SIA 下の活動であり、SIA は 1977 年に対日強硬派 5 社が設立した米国の半導体業界団体である。SIA が日米半導体摩擦・日米半導体協定に大きな役割を果たしたことはよく知られている。SIA が米国半導体産業の再浮上を狙い、ロードマップの作成を行った。1987 年には、SEMATECH の設立に至っている。SEMATECH では、14 の半導体メーカーと政府が製造課題の克服とリスクのシェアを図った。

1996.7 の第二次日米半導体協定の終結は次の契機であった。1992 から続いた NTRS は、1998 から日本、台湾、韓国、欧州が参加する ITRS に拡大され世界の主だったプレーヤーを網羅したロードマップ活動に移行した。リソグラフィ関係では SEMATECH が主催する Workshop、Symposium と共に、研究開発の動向を拡散させ、技術候補の把握、開発リスクの分散、開発の加速、技術の絞り込みに寄与した。ITRS の議論は、開発資金の注入に影響し、本稿で議論していくリソグラフィ技術の世代交代を誘導し、露光装置メーカーの寡占化に発展したとみることもできる。

3. リソグラフィ技術開発の歴史

3.1 コンタクト露光からダブルパターンニングへ

“Chronology of Lithography Milestones”, Version 0.9 May 2007, by Atsuhiko Kato¹⁰に、露光装置を切り口に、今日に至るリソグラフィ技術が網羅され整理されている^[3]。コンタクト露光に始まり、プロキシティ露光、1:1 ミラースキャンから縮小投影露光へと突き進み、技術世代ごとに露光装置メーカーに覇者が生まれた。縮小投影露光は、step&repeat から step&scan に進展し、1990 年代の Nikon の時代を経て、2000 年代には ASML 社の時代に至った。露光装置メーカーは PE、Nikon、Canon の様に光学機器メーカーが手掛けて発展

⁹ SEMATECH launches a new subsidiary, International SEMATECH, expanding the involvement of its non-US members in programs on 300 mm, lithography, ESH, and manufacturing methods (1998)

In January, SEMATECH's name officially changes to International SEMATECH, reflecting a unified global consortium (2000).

¹⁰ http://www.lithoguru.com/scientist/litho_history/Kato_Litho_History.pdf

したケースとデバイスメーカーが元となった ASML、Hitachi に代表されるケースに大別される。露光装置の歴史には、K&S(Kulick & Soffa, 1965~)、Cobilt(1972~: →Computer Vision→Applied Materials)、Kasper(1973~)、Perkin Elmer(1973~; PE Micralign projection scanner: Micralign300, Micralign500、Micrascan: →SVGL→ASML:)、Canon (1973~; PLA-300、PLA-500/600、1980~; MPA-500、FPA...)、GCA (1978~; DSW 4800: GCA→General Signals_GCA→Integrated Solutions, Inc.(ISI)→Ultratech)、Nikon (1980~: NSR-1010G、...)、Censor (Censor →PE 1984)、ASML (Philips and ASM launch ASML 1984: PAS 2000/10、...)、Ultratech、Hitachi (...LD-50xx)の名前が挙がるが、多くのデバイスメーカーが何らかの露光装置開発を行ったこともよく知られている。SVGLは、PEの技術を継承し、Step&Scanシステムをいち早く1990年代始めには世に送り出し、250 nm (lamp)への短波長化で先行したが市場を握ることは出来なかった。最終製品は、ASMLにマージされた後、IMECに納められたF2 157 nmプロト機であった。日立製作所がStepperと手掛け、i線を最後に撤退している。ASML社は後発で有ったが、Philips社での基本技術開発を基に、1985年にg線で一号機を出し、1987年にCanonに先行してi線を投入、参入から着実に韓国・台湾市場でシェアを伸ばし、1997年にKrF Step&Scan、1998年にArF Step&Scan、さらに2000年に画期的なTWINSCAN platformを投入し、2002年に市場シェアトップに躍り出た¹¹。結局、2000年代にはStep&Scanを手掛けるASML、Nikon、Canon三社の寡占状態となり、2010年代にはASMLが先端市場すなわち液浸露光機市場の80%を獲得して、Nikonがその市場に果敢に挑戦している状況に至っている^{[4]-[7]}。

縮小投影露光装置の歴史は、短波長化、高NA化、Low-k1の実現の歴史である一方、処理能力向上の歴史でもある。しばしば解像性能と焦点深度を表す次の二つの式で縮小投影露光の歴史が整理される。

$$R = k1 \frac{\lambda}{NA}$$

$$DOF = k2 \frac{\lambda}{NA^2}$$

R: resolution(解像力)

NA: numerical aperture(開口数) NA=n sin θ

DOF: Depth of Focus

k1、k2: process などによる定数 点光源の分解能 k1=0.61、二光束干渉条件 k1=0.25が導かれている。k2は通常0.5。(1:1 Full Wafer Mirror Projectionでは、NAの限界を0.167としている^[8])

最先端の193 nm water immersionでは、究極の二重極照明を構築して二光束干渉条件でk1~0.25、NA=1.35で計算できるLine & Space R(Half pitch) ~ 36 nmを得る。

11

http://www-qas.asml.com/doclib/investor/presentations/2007/asml_20070918_BofA_Tech_Conference_-_ASML_presentation.pdf

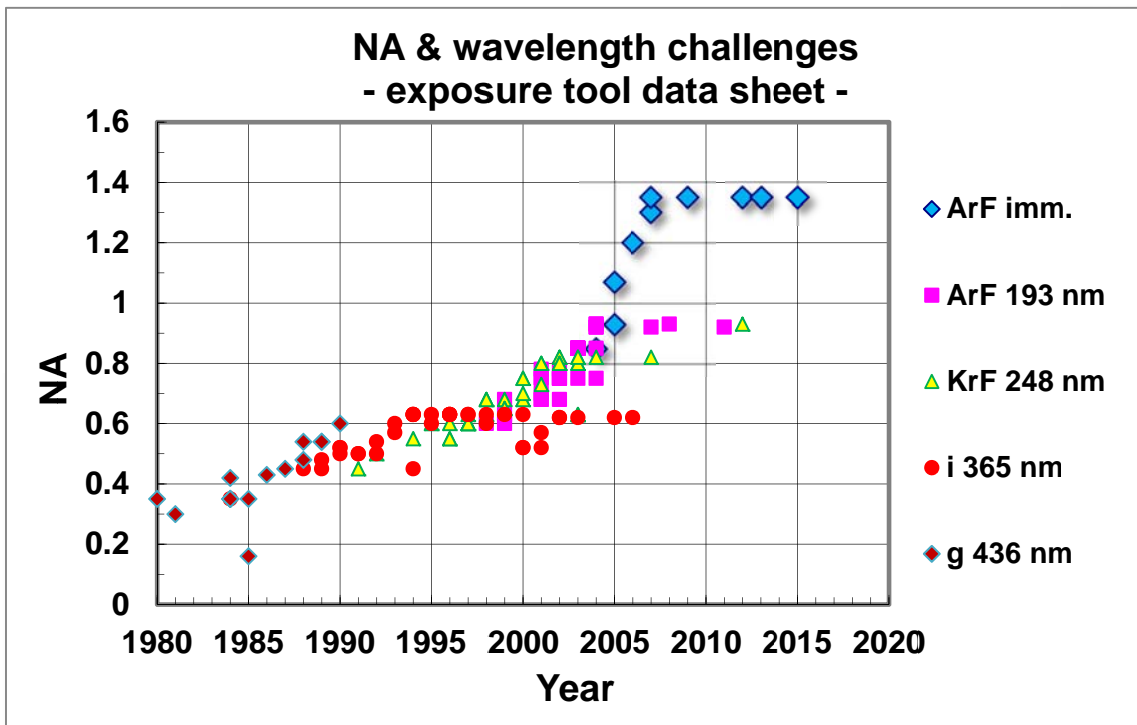


図2 短波長化、高 NA 化の歴史 (Nikon、Canon、ASML、SVGL 社等の公開情報をもとに作成)

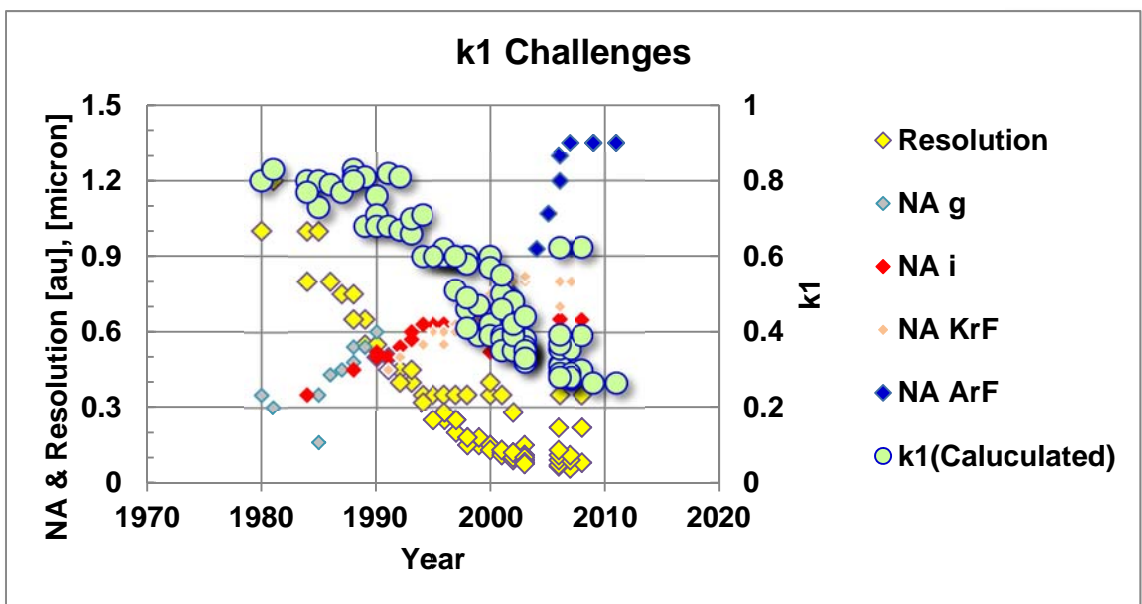


図3 Low k1 化の歴史 (Nikon、Canon、ASML、SVGL 社等の公開情報をもとに作成)
 今日、300 mm ウェハで処理能力 200 wph(wafer/hour)があたり前の開発仕様になって

しまった。ウエハの平坦化が焦点深度の確保を緩和し、高 NA 化、Low-k1 の開発を導き、平坦化は CMP 技術の登場によってもたらされ、高 NA 化は、偏光照明の採用に至った。高価格化という見方もできる。最初に開発されたステッパは 1 億円足らずであったが、解像性能に対応してほぼ一率で価格は上昇し続け、最新鋭の液浸機は 40~50 億円に達している(現製品でも、i 線、KrF、ArF_Dry、ArF 液浸の価格比は、1:2:4:8。次世代 EUVL はさらに倍の価格とされている)。

NA、k1 は限界に向かって突き進んで来たがその進展は大きな飛躍をいきなり実現して得ているわけではない。位相シフトマスク、OPC、SRAF、ILT に代表されるマスク技術、レジスト・レジストプロセス、照明光学系に加えてウエハの CMP 平坦化や、反射防止膜技術の寄与、更に、リソグラフィから生じる設計制約を取り込み、デバイスパターンを単純化し、その時点で完成度を見据えて新たな技術を採用して高 NA 化、Low-k1 を実現している。一度登場した技術は次の波長に移って解像力が改善されても省略されない。その技術をさらに改善して取り込み続けることにより更なる解像性能の達成やプロセスウインドウの確保に結び付けてきた。また、リソグラフィ技術にとって計算機環境は制約条件であるとともに前提条件であり技術開発の成果である半導体デバイスが生む計算機の処理能力が新たなリソグラフィ技術に結び付いてきた。

露光装置開発では、光源に加えて、硝材、反射防止膜コーティング、ページといった透過率に関わる課題が大きい。KrF、ArF では合成石英の開発が鍵となり透過率・照射耐性の改善は継続的に続けられてきた。また、g 線の時代以前から光強度の大きな表面に堆積物が生じ透過率、反射率が劣化していく問題が知られていたが、短波長化に伴って顕著になり、高度な雰囲気制御(ページ)技術が開発された。マスクにも生じ曇りとなって透過率を低下させ、点在して異物となり、ウエハに欠陥を転写した。成長性欠陥(Haze)と呼ばれ、ペリクルの貼られたマスクであっても表面の残留物・吸着物を核として雰囲気に微量に存在する有機物などが固定される。ペリクルには、枠に貫通穴が設けられ雰囲気・圧力を同等とする機構が設けられており、パーティクルの侵入を防ぐためにフィルターが装着されているが Haze の原因物質を防ぐ機能は乏しい。Haze は、短波長化でフォトンエネルギーが大きくなることでさらに顕在化する為、露光装置開発では設計段階からの検討が不可欠である。

300mm ウエハが本格化する頃からウエハ処理枚数が仕様に露出してきた。定義が明確にされ(125 shots/wafer: レジスト露光量 ArF 30 mJ/cm²、KrF 50 mJ/cm²、i-line 200 mJ/cm²)、差別化を顧客に訴追する競争が始まった。結果として、wph(wafer per hour)は、改善され続けている。更に稼働率等を取り込み wpd(wafer per day)で CoO をアピールする。スキャン速度と加速度の開発競争である。今日、700mm/sec を実現しているが、マスクステージはその四倍速である。また、位置決めは六軸対応であり、高次のダイナミック補正を行う。NA 1.35 の限界を迎え、DP、MP の要求に答えるべく重ね合わせ精度の向上が図られている。収差の更なる改善はもとより、高さマッピング機能の高速化、精度向上、補正

機能の高次化も凄まじい。

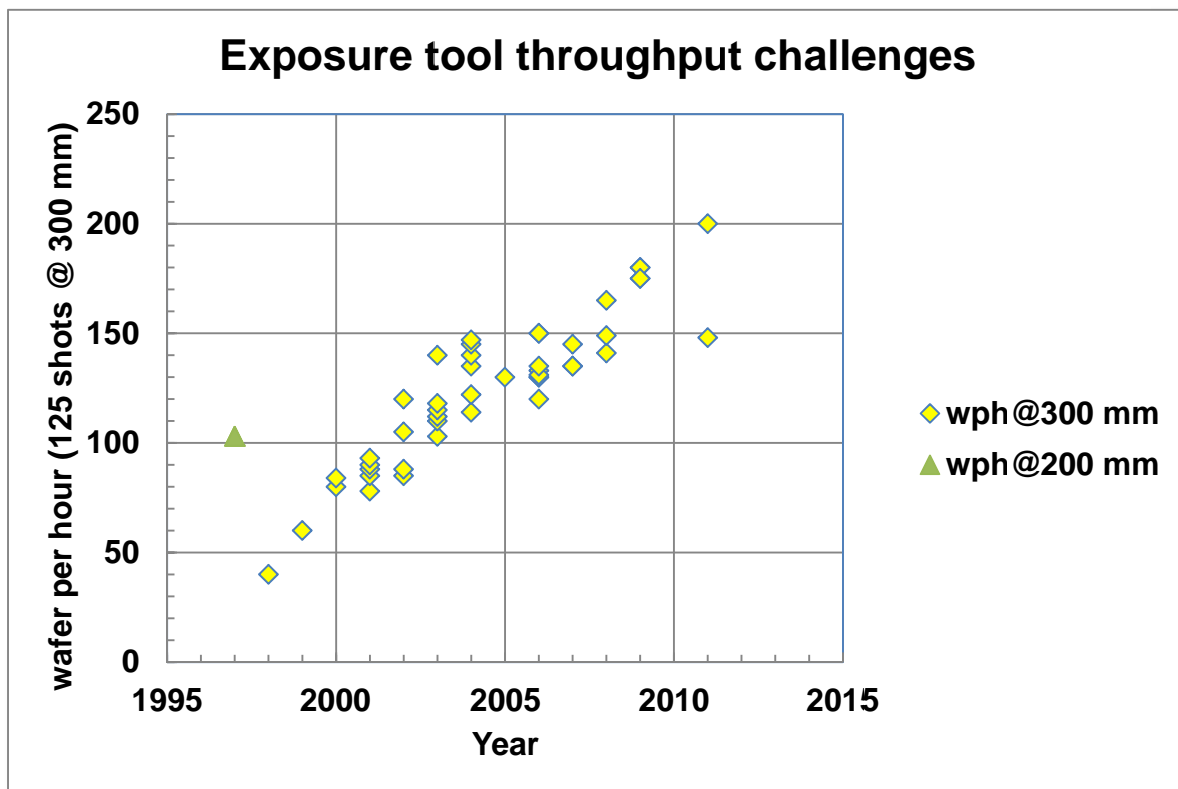


図 4 スループットの改善 (Nikon、Canon、ASML、SVGL 社等の公開情報をもとに作成)

露光装置メーカーの寡占化が進んだが、その過程で SVGL 社の去就は大きな影響を残した。日米半導体摩擦・半導体協定に見られる急激な海外製品の流入拡大からの産業保護だけでなく、米国では国防の見地からの半導体産業への関わりが顕著にある。本来は特殊な国防の装備品調達にかかわるデバイス製造を国内メーカーで行い、技術の流出を防ぐことが目的である。デバイスだけでなく製造装置にも関心が向けられ、Nikon、Canon が過半を握っていた先端露光装置への依存に懸念を持ち、露光装置メーカーの米国内維持に腐心していた。その対象はまず GCA であったがその後は SVGL であった。SVGL Micrascan は IBM と密な関係を持って始まっている。1993 年までは IBM のみが顧客で有ったと言ってもよい。SEMATECH も数台の導入を行って開発を促している。1994 年からは海外を含めて多くの顧客に納入している。IBM とデバイスの開発などで関係していた東芝、Sony が開発に導入した。資金の投入は IBM に加えて、1995 年には、Intel, Motorola Inc. and Texas Instruments Incorporated からも得た。SVGL 社は並行して、April 1993 から November 30, 1994 の長期に渡って Canon と提携交渉を行った。この交渉は米国商務省の拒絶にあい頓挫した。非常に興味深い記載がある^[9]。原文には

「The Company and Canon were unable to reach agreement and the letter of intent expired on November 30, 1994. Although Canon is contractually prohibited until April 2003 from manufacturing a specifically defined step and scan photolithography machine or disclosing related information, Canon could introduce a product that includes certain step and scan technology without violating this prohibition. As a result of the expiration of the letter of intent, the Company believes that Canon has accelerated its previously suspended development of a step and scan photolithography product which will compete with Micrascan.」

と記載されているが、Canon は 2003 年 4 月までの 10 年間制約を受ける。米国の処理に関わる DoD 1995 レポートも興味深い^[10]。

SVGL 社は PE 社の流れを汲み Catadioptric を採用し、F2 では CaF₂ で製造した大きな Beam splitter を採用した。SVGL は Scan の草分けであるがステージは縦型で、光学系が Catadioptric で、短波長化で先行するなど先進的であった。SVGL はまたスキャン長を伸ばすマスクサイズにも取り組むなど多くの技術に取り組んでいた。後に Nikon、ASML、Canon はスキャン露光をレンズで水平ステージの構成で投入したが、スリット幅は SVGL に倣っている。

3.2 SEMATECH、IMEC、ANT/CNSE

SEMATECH¹²、IMEC¹³、ANT/CNSE¹⁴は、半導体技術の研究開発に大きな存在感を示している。90 年代前半に SEMATECH 主催で開催された何回かの Workshop の終了後に、SEMATECH メンバーである米国のデバイスメーカーが集まって、今後の方針と対策に関する議論がなされる場があった。そこに日本のデバイスメーカーの代表とヨーロッパの代表 (IMEC) も呼ばれ、議論への参加と方針への提言を求められた。しかし最終的な議論は、米国のメンバーだけで決定されていた。90 年代後半になると日本のメーカーの代表も複数となり、韓国や台湾からの代表も参加するようになった。さらに SEMATECH は、90 年代後半からは積極的に Work Shop や Symposium を開催し、世界各極の技術者の参集を促し、デバイスメーカーの必要とする技術の開発を鼓舞した¹⁵¹⁶¹⁷。国内では 1996 年度から (株) 半導体先端テクノロジーズ (Selete) が、300mm の開発を行い、1997 年度からは ArF 露光に取り組み、そこから「あすかプロジェクト」に発展した。あすかプロジェクト第 1 期：2001 年度～2005 年度では、F2 と EPL、第 2 期：2006 年度～2010 年度では、EUVL に取

¹² <http://www.sematech.org/>

¹³ http://www2.imec.be/be_en/home.html

¹⁴ <http://cnse.albany.edu/WorldClassResources/CNSEAlbanyNanoTechComplex.aspx>

¹⁵ Next-Generation Lithography Workshop (involving experts from all over the world) (1997)

¹⁶ The First International Symposium on 157 nm Lithography (drives industry acceptance of the manufacturability of optical lithography to below the 100 nm technology node) (2000)

¹⁷ First/Second immersion workshop (2002/2003)

り組んだ。

4. F2 157 nm

4.1 F2 157 nm の選択

F2 が候補に挙げたのは 1990 年以前で、既に KrF、ArF、F2、Ar2 の流れが描かれていた。短波長光源の選択肢から出されたものである。90 年代後半になり、ArF に目途が立ち、波長が 81%となる F2(g→i 84%, i→KrF 68%, KrF→ArF 78%, ArF→F2 81%, ArF→Ar2 65%)が、他の NGL 技術、PXL、EUVL、EPL(SCALPEL/PREVAL)、IPL 等と比較された。157 nm は一世代と短命位置づけられ、透明な硝材、光学系、真空仕様（ガスパージ）、マスク、レジストは極めて困難な課題であり、1997 ITRS には 157 nm が示されていなかった。候補は EPL、EUVL であった。しかし、1998 年に入っても NGL 候補の開発は停滞しており、ポスト ArF 開発の本命に F2 157 nm が押し込まれた。日本で開催された SEMATECH と ASET 主催の会議で、Intel が飛び入りの意見として F2 の開発を提案し、これが本格的な開発の発端となった。SEMATECH はワークショップを立ち上げ、半年間隔で開催した。

当初から F2 157 nm の開発期間には無理が存在し懸念されていた。KrF 248nm は 1970 年代後半には文献に登場し、1988 年には、NSR-1505EX が登場し、1997 年に 0.25 μm の生産に寄与していた。工場導入までの開発期間はデバイスの試作に耐える露光領域を有している装置の登場から考えても 10 年かかっていた。レーザ光源、化学増幅系レジストの開発は重く、その間、i 線が延命された。KrF 248nm への本格的な移行は結局、300mm で Scanner であった。ArF 193 nm は、1992 年に文献に、PAS5500/900 が 1998 年に、FPA-5000AS1、NSR-S305B が 1999 年に登場していた。2001~2002 年の 130 nm 生産への導入が予定されていた。ArF ではレジストを含めて基本的な技術課題には解があったが、それでも、上記露光装置の登場から 3~4 年が必要であり露光装置は次機種が登場していた。しかし、F2 157 nm は、NGL の遅延に伴って急浮上(再浮上)した為、1999 時点でのターゲットは 2005 年の 70~100 nm のデバイス生産と、全く開発期間に余裕がなかった。Full field のプロト機の計画は 2003 年であり、2005 年まであまりに短かかった。しかし、この時点で他の選択肢はなかった。

この間の ITRS roadmap の report をもう少し詳細に追うと別の切り口で流れが鮮明になる¹⁸。

ITRS1997 では、157 nm は無く 130 nm の候補には 193 nm DUV、PXL、EPL、EBDW、EUV、IPL が挙げられていた。100 nm の候補は、EPL から始まっている。

ITRS1999(Jan. meeting)では 157 nm が 90 nm、65 nm に記載されている。Spring Meeting では、区切りが 180 nm、130 nm、100 nm、70 nm、50 nm となり 180 nm~が KrF、130 nm~が ArF、100 nm~が F2 であった。50 nm~には 157 nm F2 は登場せず、基本的に 157 nm F2 が一世代の技術であるとしている。

¹⁸ <http://www.itrs.net/> ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors)

ITRS2000では同様に157 nmが193 nmに続き100 nmに記載され、70 nmでは157 nm + PSMがトップに位置する。157 nmは50 nmには記載されていない。

ITRS2001ではまだimmersionは登場していない。区切りが65 nm、45 nm、32 nmとなり、157 nmが65 nmの一番目に記載され、45 nmでは157 nmが消え、EUVが一番目に位置し他のNGLが並ぶ。

ITRS2002の議論でも、まだimmersionは登場せず、100 nmが193 nm + PSMとPELに絞られており、157 nmは65 nm一世代の技術となっている。

ITRS2003では65 nm以降に157 nmが残る(65 nm: 193 nm + RET + litho-friendly designs、157 nm + RET + litho-friendly designs、193 nm immersion lithography、EPL、PEL)が、193 nmの延命が本命とされ、157 nmが間に合わないとの考えが反映されているとともにここに初めて193 nm immersionが記載される。

ITRS2003 December Meetingでimmersionが65 nm、45 nm、32 nmに記載されたが、この時点では、Waterの記載がなく、厳密な切り分けをしていない。また、157 nm immersionが入っている。

ITRS2004 July Meetingの議論では、157 nmは157 nm immersionでしか記載されていない。65 nmにPELが残り(65 nm: 193 nm + LFD、193 nm immersion、PEL)、EUVは無い。45 nmでEUVが193 nm immersion + LFDに続く。

ITRS2005 July Meetingで157 nmが消えた。32 nmの候補のトップにEUVが残り、193 nm immersion with other fluidが続く(32 nm: EUV、193 nm immersion with other fluids and lens material、Innovative 193 nm immersion with water、Imprint、ML2)。

ITRS2006 updateにDouble patterningが登場した。

1999のRoadmapの議論では、NAを0.68 (KrF、ArF)、0.7 (F2)としている。Dryでは最終的にNA 0.93の製品まで開発されたが、この時点では高NA化の進展を予測しきれていない。

4.2 F2 157 nm 技術開発

F2 157 nmの開発課題は、まず光源、透明材料の見極めにあり、露光装置だけでなく、マスク、レジスト、さらにペリクルに材料開発の先行が必要であった^{補足²}。

光源に関しては、1997年に、Lambda PhysikaからF2レーザのレポート^[11]がある。157 nm域では硝材が限定されCaF₂ (蛍石)、MgF₂が透明材料として知られていた。CaF₂はカメラで色消しに使われるなど光学業界ではよく知られた材料であったが、F2露光装置に搭載するレンズで要求される仕様には至っていなかった。CaF₂には、熱膨張係数が大きい(2×10⁻⁵/K)という問題もあった。マスク基板としても使うに値しない数値で、EPL、EUVLを候補として挙げる一要因であり、開発着手の障壁となっていた。合成石英SiO₂は、8~9eVのバンドギャップを有し、本来は145 nm程度の波長域まで光透過性を有するはずであった(CaF₂ (10.0eV)、MgF₂ (11.8eV))。Ar₂ 126 nmはさらに短波長であるため硝材

の選択肢がさらに無い。しかし、F2 レーザと並行して F 添加合成石英を用いることによりマスクブランクで必要とされる透明度を達成する知見が得られ、マスク開発に目途が立ち、マスクブランクとしての合成石英開発は、1999 年には数社の硝材メーカーの数値が纏められ報告される段階に達し、合成石英ガラスメーカー間の競争段階となっていた。光源とマスクブランクに解が見え露光装置メーカーのリスクは低減した。常に五年後の候補であった EPL、EUVL などの NGL は、この時点でも ArF の後継に値するまでには開発が進んでいなかった。まして、NGL の絞り込みすらできるレベルではなかった。

ペリクルがマスクに関わる最重要課題として残された。開発は、従来のペリクルを継承するメンブレンタイプ(ソフトペリクル)を理想として透明樹脂の開発に臨んだが、候補であった F 系樹脂はなかなか透明度が達成できず、照射耐性に乏しく、透過率低下、アウトガス、破損が回避できなかった。KrF、ArF のペリクルでは、旭硝子が提供するサイトップ樹脂が用いられており F2 ペリクルの開発でも旭硝子が国内での開発の中心となった。ソフトペリクルの開発は困難を極めていたため並行してハードペリクルの検討・開発が進められ最終的には 800 μm 厚の合成石英を用いる構成に収束した。この開発でも旭硝子の石英部門が国内での開発の中心となった。ハードペリクルはレンズと同じ扱いとなるためレンズ並みの、面精度、膜厚分布、さらには重力撓みに対応することが求められたが解の存在確認には至った。露光装置は量産機では対応するとされた (ASML 社の SVGL MS VII はレチクルが垂直姿勢で有った為 300 μm 厚で可能とされていた。)

F2 157 nm 光学系は All CaF₂ で検討され光源狭帯域化が困難な事情からミラーを組み込む Catadioptric lens であった。157 nm laser は、自然に発光している場合は単一の peak では無く bandwidth は広がった。High NA(>0.8)が必要で、選択肢は、bandwidth 0.15 pm で、all-refractive lens、0.5~0.6 pm で two material lens であった。Catadioptric lens は 0.5~1.0 pm を可能としていた。BaF₂ の開発、狭帯域レーザの開発が不透明で有った為 Catadioptric lens が志向された。この点では SVGL 社の設計が先行していた。SVGL MS VII は多軸でビームスプリッターを組み込んだ縦型であった。193 nm 以前から硝材、コーティングの経年劣化は問題であったが、157 nm では短波長化によりさらに高エネルギーのフォトンで硝材、コーティングの損傷となる。10 年といった寿命が要求となる。照射耐性は光源が開発途上で有ったこともあり評価すら課題となった。光学用の CaF₂ は結晶成長で製造される。Camera では色消しレンズの構成に採用されていたが、露光装置では高 NA 化で必要とする 250 mm 径が求められた。また、157 nm 波長域の透明度の改善も要求された。透明度のある大きな結晶が出来ていなかった。多くの硝材メーカーが開発に取り組んだが Schott lithotec が欧州の資金のもとに大規模に開発を進めた。

露光装置開発に暗雲をもたらした大きな出来事が 2001 年に起こった。NIST から CaF₂ の IBR(Intrinsic Birefringence)が報告された^{[12] [13]}。IBR は設計に考慮されていなかった為 157 nm の開発に波紋を投げかけた。集中した検討から一年足らずで結晶軸を組み合わせることで収差を目標に納める解が示され克服されたが開発の遅延を伴った。また、大口径

CaF₂ への要求が緩和されるわけではなかった。CaF₂ の開発では、ASML は Schott、Canon は Optron、Nikon は応用光研、SVGL は Bicon と関係が深かった。Nikon、Canon も CaF₂ のプラントを立ち上げた。Canon は 2003 年には子会社 Optron への \$40 million 以上の投資計画まとめていた¹⁹。

F2 157 nm では、光路は酸素（水）の吸収を避けるため窒素パーズが必要となる。また、ArF にもまして Contamination の問題が大きく課題に挙がっていた。酸素、水の吸収が大きい為、光路は Pure N₂ あるいは Pure He で満たし、残留酸素、残留水分を ppm、sub-ppm レベルにする必要がある。ハイドロカーボンの排除も求められる。内壁、レジストからのアウトガスも問題となる。レジストからのアウトガスは露光に伴って発生しウエハに近接する面にデポする。レジスト材料側での開発も必要になる。

レジスト開発ではまず 157 nm での透明樹脂の選択肢は F 系樹脂であった。化学増幅系で既存の TMAH 現像液との組み合わせが嗜好された。ベースとなる樹脂は旭硝子等の F 系樹脂に強みを持つ企業に依存していた。レジスト開発では露光装置が不可欠で Selete、SEMATECH 等が小フィールドの露光装置を導入してレジストの開発を促進した。

F2 157 nm 開発はコンソーシアムの存在感が増した開発であった。

日本では Selete、海外では SEMATECH、IMEC が重要な役割を担った。ArF の開発に目途をつけていた ASET が 1997 年 4 月に、当時の通商産業省機械情報産業局に VUV project、F2 (157 nm) から Ar₂ (121nm) (注：波長が 121nm になっている) への提案を行っている。この年、1997 年 5 月には、Bloomstein T M(MIT) の EIPBN の講演^[11]、1997 年 10 月には ASET 笹子氏の秋応物(応用物理学会学術講演会)での報告がなされている^[14]。1998 年の時点では Kr₂ 146 nm の Paper も散見される。1998 年 6 月には、IEEE VLSI Symp. で ASET 笹子氏が Plenary Talk で "Lithography Solution for 0.1u Generation" と題して講演している^[15]。1999 年には、光リソグラフィ技術総合調査(INOL)を組織化し、VUV 関連大型プロジェクト(250 億円規模) の提案に向けて活動し、Selete project 等に繋がる。1999 年 6 月に開催された VUV Workshop in Japan は一つの活動であった。欧州では、ASML 社が中心となって Medea+ project T401/Fluor²⁰ が動いた。連携して、UV2LITHO²¹ が IMEC を軸に組まれた。米国では、SEMATECH、NIST、SRC、大学等に DARPA 資金が投入されている(米国では、国の資金投入が DARPA を軸になされ、産業振興目的では州の資金が投入されている。のちに SEMATECH は TX Austin の契約が終了すると NY との契約に移行し、Albany に拠点を移し、CNSE の核となって資金を得ている。もともと DARPA は、国防の為の ASIC デバイス製作技術に固執してきた。) 。SEMATECH は 1998 年 12 月の NGL Workshop で Voting を

¹⁹ Tokuyama が NEDO プロジェクトで CaF₂ の開発を行っている。他に Corning, Inc. (Corning, NY), Optovac (Sturbridge, MA)

²⁰ Medea+ project T401/Fluor: European initiative for 157 nm lithography, (Project timing: 1/1/2001 - 30/10/2004)

²¹ European IST project/UV2LITHO, IST-2000-30175: Usable Vacuum Ultra Violet Lithography, (Covering period 1.9.2001-30.9.2004)

得て EUV 一番、SCALPEL (scanning e-beam system: scattering with angular limitation projection electron-beam lithography)を二番とし 1999 年のメッセージに反映していた。この時期に SEMATECH は International SEMATECH へと拡大していた。90 年代後半の大きな取り組み、i300i が収束に向かいリソグラフィへの取り組みの拡大へと移行していく時期であった。

Selete は 1999 年度から F2 レジスト材料の探索・開発に取り組み、1999 年に Ultratech の 157 nm Microstepper の導入を決めていた。Ultratech の数台の Microstepper は Cymer の Laser を搭載し、2000 年には Resist 評価結果を出していた。Selete は 2001 年度には、マスク三社、マスク用電子ビーム描画装置メーカー三社との共同開発体制を構築した。2001 年には、SEMATECH、Selete は、Exitech 社製の Microstepper (こちらは 6-watt, 157 nm Novaline F630 F2 laser from Lambda Physik Inc.)での転写に漕ぎ着け、2002 の SPIE で報告が出た。報告のポイントに光学系の劣化・コンタミがあった。2000 年には、F2 157 nm のプロト機の導入計画が決まって行った。Selete は Canon、IMEC は SVGL を選択し、レジストの開発に使う。TSMC も SVGL Micrascan VII を選択していた(Sept. 2000)。ASML 社は量産機 AT1600 を提案し PO 獲得に邁進していた²²。

4.3 ArF 193 nm 液浸技術開発

ArF 157 nm 液浸露光技術の開発では TSMC B. J. Lin 氏のチャレンジ、SEMATECH の果たした役割が絶大であり、早期に取り組みを示した Nikon が開発を牽引した。特に、Nikon 大和氏が示したローカルフィル機構が装置開発の方向を決めたと考えられる。

液浸技術は光学の世界では長い歴史を有する確立した技術で有る。半導体露光装置への適用も何度か浮上していた。B. J. Lin 氏自身も以前から論文などで示している。しかし、過去の検討では、液浸顕微鏡で採用されていた高屈折率液体、すなわちオイルを用いる検討であった為、 $n=2$ を超える高い屈折率を用いて高 NA が得られるものの、高い粘度や透明度の不足などの光学特性、さらにその材料価格などが壁となり、机上検討レベルに終始していた。その間に、より波長の短い露光装置が出現して液浸検討は立ち消えとなっていた。明らかに半導体露光装置を意識した液浸露光装置の特許は古く、[USP 4346164 Filed Oct. 6, 1980, Werner Tabarelli et al. \(Liechtenstein\)](#)には液の循環供給が提案されている [16]。

²² EEtimes: 7/13/2000 9:11 AM EDT

“Nine chip makers sign up with ASML to develop 157-nm litho tools”, VELDHOVEN, the Netherlands--ASM Lithography today announced the nine leading chip makers that have joined its consortium to develop 157-nm wavelength exposure tool. The consortium is one of several being formed by lithography suppliers to build support for their next-generation technologies.

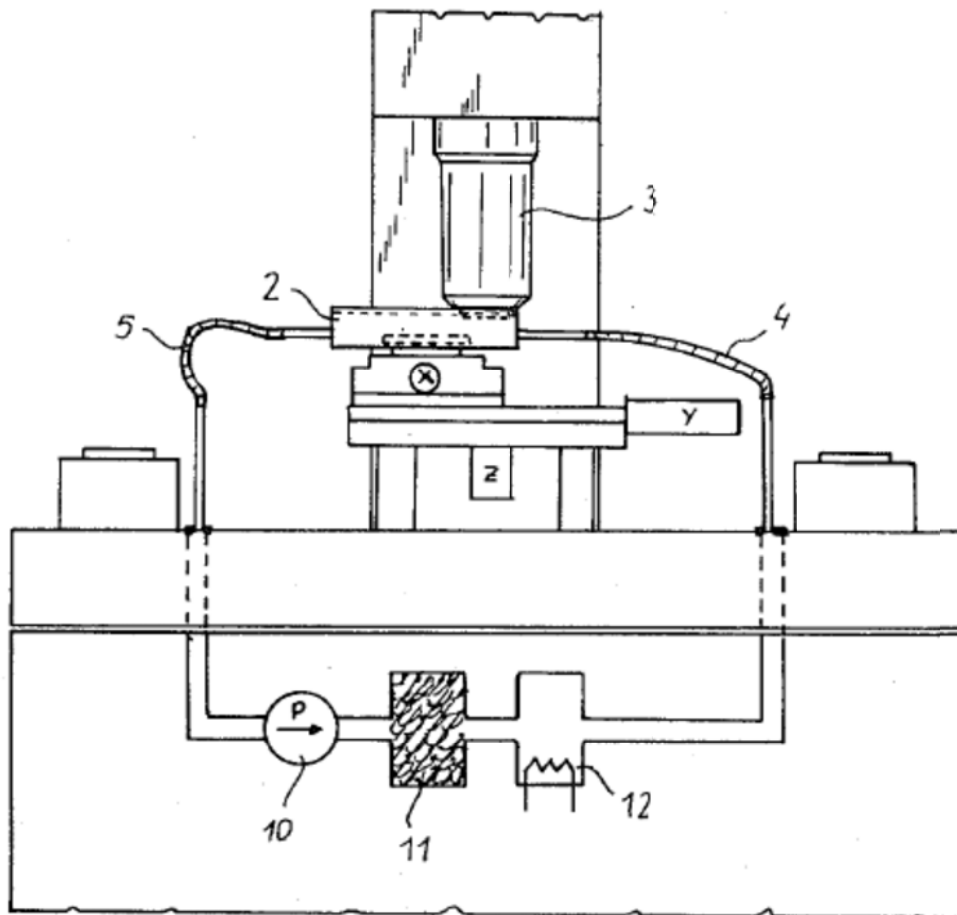


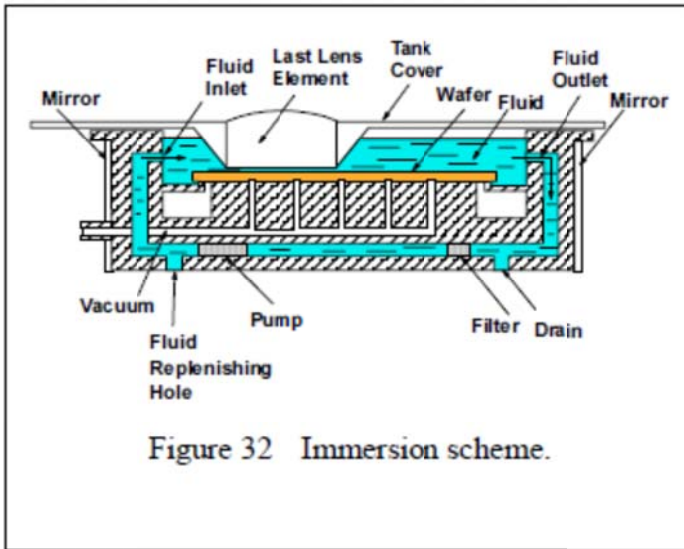
図5 USP 4346164 Filed Oct. 6, 1980, Werner Tabarelli et al.^[16]

大きな契機が 2002 年 SPIE(spie2002 March 5-8 Santa Clara)での TSMC B. J. Lin の Invited talk である^[16]。液浸をしっかりと指摘している。前年 2001 年に 193 nm の液浸液の候補に純水を指摘した EIPBN での M. Switkes らの発表がここで引用されている。EIPBN での発表は、157 nm の延命を主眼としての perfluoropolyethers を用いる 157 nm 液浸の検討で、193 nm での純水は従な内容であった(Paper として J. Vac. Sci. Technol. B 19, 2353 (Nov./Dec. 2001)に掲載される)^[17]。F2 157 nm 露光装置の開発が進み始め、その次の 45 nm 世代の選択肢の第一が EUVL とされていた 2001 年に、65 nm 世代、一世代の短命技術とされていた F2 157 nm の延命を可能にする液浸技術を提案する斬新な Paper であったが、既に何回か過去に登場してきた液浸露光装置提案の域にあり、また MIT からの発表であったことも、発表の場が EIPBN であったこともあったことも加わってリソグラフィ関係者の認識を変えるには至らなかった。翌年、B. J. Lin 氏がそれを引用し、193 nm water immersion が 157 nm dry を凌駕する技術であることを Invited talk で SPIE の全参加者に鮮明にしたことになる。Optical Microlithography XV のセッションでは、M. Switkes も、前年の EIPBN の報告を発展させた液浸露光技術の講演を行っており、B. J. Lin 氏の Invited talk を聴講した

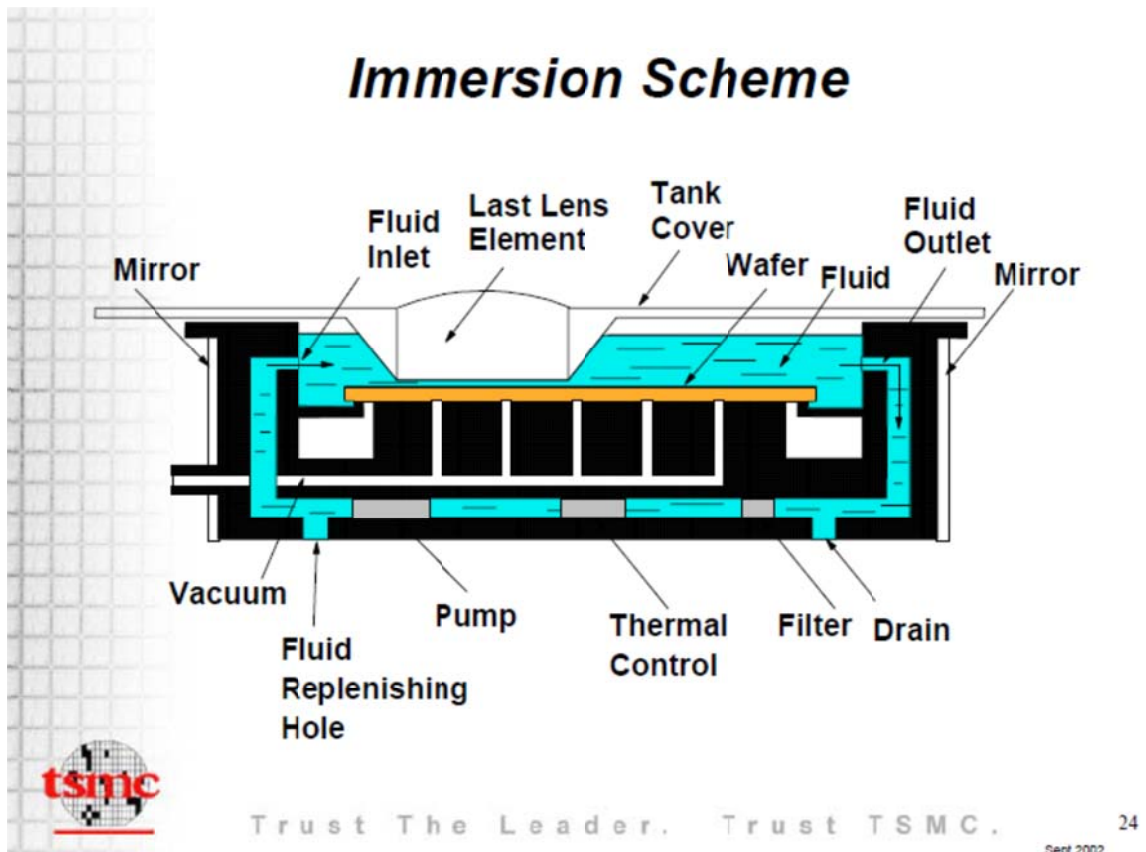
リソグラフィ関係者の注目を集めるに至った^[18]。

さらに大きな役割は、Nikon Soichi Owa らであった。2002 年(3-6 September)の 3rd 157 nm Symp. で 157 nm と並べて 193 nm Immersion を Nikon の選択肢として描いている^[19]。このシンポジウムは液浸にとって象徴的である。F2 157 nm のシンポジウムであるにもかかわらず ArF 193 nm 液浸は Nikon 大和氏、TSMC B. J. Lin 氏^[20]、MIT M. Switkes and M. Rothschild ら^[21]の三件が触れている。ASML、Canon、SVGL はこの時点では言及していない。更に指摘しなければならない点は、B. J. Lin 氏は 2002 年 3 月の SPIE で使ったウエハが水没する絵(図 5)を示し、Nikon 大和氏は Nikon Y. Fukami and N. Magome の 1999 年の特許(PCT/JP99/1262 (1999) WO99/49504)^[24]のローカルフィル (レンズとウエハの間隙だけに液) の図面(図 6)を示している点である。M. Switkes and M. Rothschild らは、157 nm、193 nm 液浸を包括的に検討し、193 nm に Water と重ねて指摘している。

液浸露光装置の実現には三つの方式が考えられる。一つは、先述した Werner Tabarelli らの特許^[6]で描かれている Wafer stage に水槽(Bus tab)を載せ Wafer が水没する方式で Lin 氏の示した絵もこの範疇である。二つ目は Wafer stage が水槽(Pool)に丸ごと水没する方式、三つ目は Nikon 大和氏が示した Wafer stage のレンズと対する領域だけに純水を保持する Nikon Y. Fukami and N. Magome らの特許に記載されていた”Local fill”方式である。スキャン露光ではステージの高速スキャンが大前提となるが重量と粘度の負荷は膨大でステージの水没、さらにステージ駆動系の水没では開発負担が重く、またウエハの交換機構も複雑になる為まず第二の選択肢 Pool は外される。Lin 氏が描いたウエハステージに水槽を載せる方式も高速スキャンの実現とウエハの交換機構に負担が大きい。ステージにどのようにしてウエハをチャックするかを技術開発を考えただけで気が遠くなる。Nikon 大和氏の示した”Local fill”が今日の液浸露光装置の絵姿を描き出したと考えたい。大和氏のこの講演内容から ASML、Canon が”Local fill”の未来に気付いたのではないかと思われる。大和氏はこの講演で計算結果等を報告し、157 nm と並べて 193 nm Immersion を Nikon の選択肢として描いている。

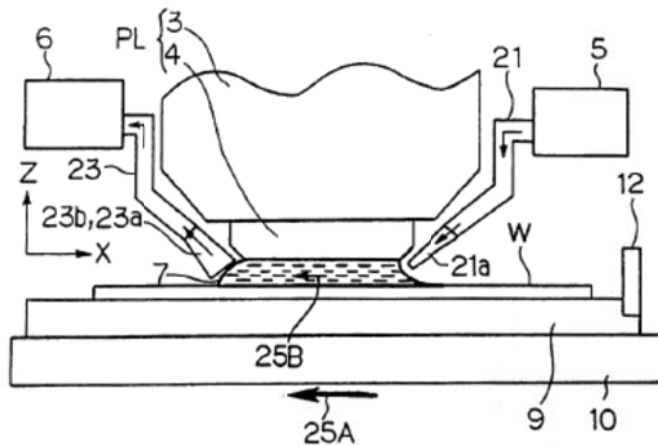


☒ 6a B.J. Lin, "Semiconductor Foundry, Lithography, and Partners" (Invited Paper), Proceedings of SPIE Vol. 4688 (2002) © 2002 SPIE, From Emerging Lithographic Technologies VI, SPIE Advanced Lithography (Micropatterning Division, TSMC, Inc.)



☒ 6b B. J. Lin, "Drivers, Prospects, and Challenges for Immersion Lithography", Sep. 11 2002 3rd 157 nm Symposium

Immersion Lithography



Y. Fukami and N. Magome
PCT/JP99/1262 (1999) WO99/49504

$$NA = n \sin \theta$$

$$\begin{aligned} \text{Resolution} &= k_1 \lambda / NA \\ &= k_1 \lambda / (n \sin \theta) \\ &= k_1 (\lambda/n) / \sin \theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{DOF} &= k_2 (\lambda/n) / 2 (1 - \cos \theta) \\ &= k_2 (\lambda/n) / 4 \sin^2 (\theta/2) \\ &\sim k_2 (\lambda/n) / \sin^2 \theta \\ &= k_2 n \lambda / NA^2 \end{aligned}$$

Exact DOF should be given by ED-tree simulation.

図7 Soichi Owa, Naomasa Shiraishi, Issei Tanaka, Yasuhiro Ohmura, Jun Nagatsuka, Shunsuke Niisaka, Kazuhiro Kido and Shigeru Sakuma, "Nikon F2 Exposure Tool", Sep. 11 2002 3rd 157 nm Symposium

SEMATECH の寄与は大きい。Dec. 17 2002 には First Immersion Workshop in Austin を開催した。100 名を超える規模であった。SEMATECH は"Top ten issues"をリストし、半年での判断を企画した。また、Resist、Bubbles、Fluids Properties の三つの Task Force を走らせた。

2003 年 SPIE AL での Nikon、Owa, S. and Nagasaka, H.の講演^[22]で Local fill concept の基礎実験、二光束干渉液浸露光でのレジストパターンが提示され、液浸の開発がさらにしっかり本命と認識されたと考えられる。Local fill concept はスキャン露光の実現性に光明を与える画期的な提案であり講演で示された実験データはその後の液浸開発に多大な影響を与えている。さらに決定的な液浸への転換は Intel 社が 157 nm F2 を第一候補から落とした時点とも考えられる。Intel: Peter Silverman は 2003 SPIE での RIT、SRC、ASML、Nikon、Canon 等の報告から 193 nm Water Immersion に障壁は無いとし、2003 年 5 月には時間軸の合わない 157 nm F2 を 45 nm 世代(2007)の Intel Roadmap から外した。同時に EUVL も 45 nm 世代にはタイミングを逸しているとし、193 nm の延命後 EUV への路線を示した。この影響もあり、業界の軸足は液浸の見極めに集中された。

半年後、July 11. 2003 に 200 名の規模で約束された 2nd immersion workshop が開催され、"Top ten issues"がフォローされ、基本的に障壁がないことが Workshop の纏めとなっ

た(July 11. 2003 at IBM Almaden Center in San Jose)。液の保持方法として、ウエハが完全に液に埋没する(Pool あるいは Bath tub)タイプは消え、2003 年 SPIE AL で Nikon Owa 氏が示したレンズとウエハの間隙のみ液を満たす”Local Fill”タイプが本命視された。

ASML 社は Oct. 7 2003 には、AT:1150 を液浸対応に改造し、初の Immersion exposure を実施した。Nov. 13 2003 の ASML 社の Financial analyst 向けの資料で既に Immersion が Roadmap に載った。ASML 社でも Immersion が本命視されるに至っていた点が見える。ASML 社は矢継ぎ早に顧客の場での液浸技術開発に向けて実験機を出荷した。2004 年 8 月には、ANT に AT:1150i、数か月後には TWINSCAN XT:1250i を TSMC、IMEC、Applied Materials, Inc.に出荷した。1150i は Proto 機、1250i は Pre-production 機に位置づけられる。生産機としての製品となった XT:1400/XT:1400i NA=0.93 は、Dry でも Wet でも使える装置として開発され、液浸固有の欠陥という懸念材料を抱えていた顧客を取り込んだ。液浸の狙う本命 NA>1.0 に対しては、2006 年 ASML TWINSCAN XT:1700i NA 1.20 を出荷、2007 年 XT:1900i NA 1.35 と短期間で限界の NA 1.35 に持ち上げた。

2004 年 6 月の NGL workshop で SEMATECH が、最終的な F2 の開発中止の判断に至っている。

F2 に対して ASML 社はプロセス開発機として SVGL Micrascan VII を当て、量産機は AT1600(Carl Zeiss 光学系)を予定した。液浸が選択された時点で、確定した受注は 10 台を越え、さらに 20 台ほどのスロットをすり合わせていたとされる。Canon は、Selete に向けた FS1、自社での開発の為の FS1 一台、さらに FS2 にも着手し、三台が仕込まれていた。

Selete は、マイクロステッパを用いた F2 レジストへの取り組みや、マスク関連での共同開発体制で F2 開発における存在感を示していたが、2003 年に開発の重点が液浸、それも 193 nm water immersion に移行していく状況に全く対処できていない。加えて Full field の Canon FPA-5800 FS1 の出荷は 2004 年の 7 月と SEMATECH が 6 月に F2 をギブアップした後になっている。ASML 社は SVGL Micrascan VII を IMEC に向けて一年以上早く 2003 年 4 月 2 日に出荷している。さらに、IMEC は 2004 1 27-29 に開催された Litho Forum で Micrascan VII 評価の詳細を報告し、懸念されていたコンタミネーションは無く、装置は 4 か月安定に動作、157 nm resist の評価に適用、F2 は実用には後 4 年かかり、タイミングは 32 nm node になると纏めて、この時点で既に F2 157 nm を断念している。2004 SPIE AL では、IMEC、Selete からの報告も含めて 80 件近い Paper が 157 nm 関連で報告され 157 nm 開発は終息し、翌年の SPIE AL では件数が激減している。流れは完全に液浸に移行し、2004 年に Paper がエントリーされる 2005 年 2 月末の SPIE AL Symp.にその反映が見られる。

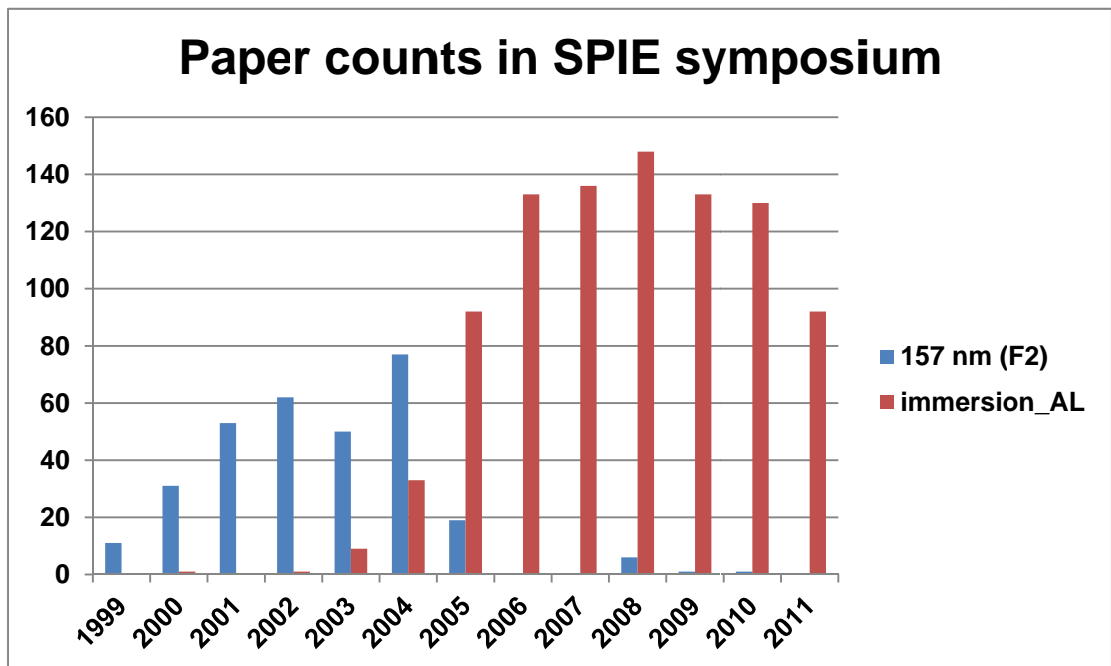


図 8 SPIE AL Paper 数 (東川が集計)

Nikon は結果的に三つの失策を犯したと考えている。Nikon は Owa 氏の上述の Paper で引用されているように特許^{[23], [24]}でステージ上での液浸構成技術(Local fill)をカバーし、液浸露光装置で最終的に採用されたローカルフィル方式のコンセプトで先行したのではないかと思われるが、先行の優位性を維持できなかった上に、 $NA > 1$ の製品として、 $NA 1.07$ のレンズ搭載機を出し、時期的な先行を狙ったものの、対する ASML のミラーを組み込んで構成する高 NA の本命、Catadioptric での $NA=1.2$ の製品に十分対抗出来なかった。さらに、Catadioptric の世代では、Nikon はミラーが三枚の奇数の構成となり、マスクパターンが反転し、対する ASML が偶数の構成でマスクが従来どおりであった為、Nikon 社が顧客に心理的な負担を強いた^[25]。また、高 NA 化の選択で ASML 社が純水液浸の限界 $NA=1.35$ ($NA=1.20$ の次の製品として) を製品化していく戦略に対し $NA=1.30$ の設計を投入する判断をした。この三点を指摘したい。さらに指摘したい点がある。Nikon 社は Local fill・液浸欠陥対策で社外を活用しきれなかった。トラックの雄 TEL との共同開発も排他的に寄与したのか判然としない。

一方、ASML 社の ArF 液浸開発に於ける顧客とのかかわり方が最終的な優位に結びついたと考えている。その前に、ASML には二つの幸運とも呼べる要素があったと考えられる。一つは、比較的容易に他社に先駆けて実機で液浸スキャン露光に漕ぎ着け、技術開発を先行出来たこと、もう一つは、SVGL 社の買収により、F2 157 nm のプロト機を SVGL Micrascan VII で提供できた点である。前者には TWINSCAN プラットフォームの寄与が考えられる。計測を Dry で、露光を Wet で行う構成が既に完成していた TWINSCAN で実現

できた。アライメントや高さマッピング(フォーカス)を Dry の状態で行い、レンズの下部では液浸状態で露光する構成である。対して Nikon 社は最終的に Tandem stage と呼ぶ設計を新たに開発し、計測専用のステージを用意することになった。また、Carl Zeiss 社が NA>1 の Catadioptric 光学系の設計で先行できたことも ASML 社にとって大きかった。顧客とのかかわり方の中でも、IMEC の液浸露光技術の開発が果たした役割は大きい。歴史的に IMEC は設立当初から ASML 社の開発と密に係わってきた。開発機を導入した IMEC、TSMC の存在は ASML 社の開発と共に考える必要がある。液浸露光技術の開発では、液浸固有の欠陥の発生に悩まされていた。TSMC をはじめとする複数のデバイスメーカーが開発機を導入して液浸欠陥の評価を進めた。当時、露光装置メーカーは開発に使える欠陥検査装置を自前で所有していなかった。欠陥検査をこなせる場合はデバイスメーカーであった。また、欠陥に関係してレジストなどの材料開発が並行して進む状況の中でもあり、開発機を多く出荷して、デバイスメーカーのフィードバックを多く得られる状況が ASML の開発を加速した面がある。IMEC はまた多くのレジストメーカーと開発のスキームを持ち材料開発で優位に立ち ASML 社の装置開発にフィードバックが働いたと考えられる。開発段階で実験機を多く提供できたかの差が課題の解決に優劣をつけたのではないかと考えられる。ASML 社はまた顧客に積極的に自社 CR のデモ機を解放した。持ち込まれた材料・プロセスのフィードバックだけでなく、顧客の取りこみに寄与したと考えられる。その点でも、Nikon 社、Canon 社は限られた場で開発を進めていたと言える。さらに ASML 社 XT:1400i NA=0.93 が果たした役割が無視できない。Dry の設定も可能となる仕様は、出荷されなかった F2 157 nm AT-1600 の代替機となったと想定され、また Nikon 社のレンズで実現する NA 1.07 液浸機 NSR S-609C への顧客の流出を阻止している。

2007年に Nikon S610C (NA 1.30)と TWINSCAN XT:1900i(NA 1.35 ASML 社液浸第五世代)が出荷されて優劣が決まった。それ以前は数%であった日本市場での ASML の飛躍は 2007 の液浸露光装置の納入にある。さらに Nikon 社にとって厳しかった状況はリーマンショックによりもたらされた市場の急激な萎縮により発生している。国内デバイスメーカーの惨状もある。2009年に各社売り上げが激減した中で ASML 社のシェアは増大し決定的な差となった。その後、円高も加わって Nikon、Canon の回復は見られず、Canon 社は液浸露光から脱落した。

G 線にはじまり i 線、KrF、ArF と進んだ開発競争の最後に登場した ArF-immersion は非常に短期の決戦であった。二年足らずで NA 1.35 まで進展している。Nikon 社が NA 1.07 で先行し、NA 1.30 を開発した。ASML 社は Dry/Wet 選択可能な NA 0.93 から、NA 1.20、NA 1.35 へと進んだ。現時点(2013)では Nikon 社は、1.35 の製品で性能競争に挑み挽回を図っている。ASML 社は 1150i、1250i を alpha 機、pre-production 機の位置づけで出し、1400i を Dry の限界 NA 0.93 で Dry/Wet の生産機として提供する顧客対応で研究開発というビジネス領域から工場投資に誘導し、液浸の本命である NA>1 の製品では、Nikon 社の先行を許さなかった。NA 1.20 の 1700i の出荷が 2006 年末までに 25 台程度まで伸びその後の顧客

確保に着実に結びついた点も注目される。特に NA 1.35 の製品の発表が Nikon 社の NA 1.30 の製品発表に遅れること数日の Semicon West 2006 期間中になされた点で顧客に与えた効果は絶大であったと考えられる。1.30 と 1.35 の NA の差は、実質の転写性能以上に心理的に顧客に大きな影響を与えたのではないかと思われる。

2008 年には、各社明確に次世代高屈折率液浸液を用いる露光装置開発を選択肢から切り捨て、193 nm 水液浸露光による延命が本命となった。開発の軸足は精度、スループットの改善となり、ユーザーにより多くの補正技術を提供する機能が搭載された。合わせ精度 ≤ 2 nm、スループット ≥ 200 wafers/hour (300 mm wafer, 125 Shots) が当たり前のターゲットになった。

ASML 社は NXT プラットフォームを投入し、Nikon 社はタンデムステージとローカルフィルノズルに加え、新たに 3 つの新技术 (Bird's Eye Control, Stream Alignment, Modular2 Structure) を採用した Streamalign Platform を投入している。大きな差を生んだ 2009 年では円高が国内デバイスメーカーの低落と相まって Nikon 社のシェアを低下させた。ユーロ安の貢献度は大きい。

4.4 F2 157 nm の終息

どちらかと言えば最大の貧乏くじは Canon であったのではないかと考える。2005 年には、Dry の露光装置をベースとした NA 0.93 の液浸露光装置が登場し、2006 年には NA>1.0 の製品が納入され完全に液浸になっているにもかかわらず、当時の Selete が Canon 社の 157 nm 露光機 FS1 を抱え続け、デバイスの研究開発に使う延命策を選択し、Canon の負担が継続した為、結局 IMEC の廃棄から 3 年以上稼働をサポートし、その間、Canon の負担は軽減されなかった。Canon 社は SVGL 社との提携交渉が拒絶にあった後遺症から脱却できなかった最悪期に F2 に取り組んでいたとも伺える。逆に ASML 社は、抱えていた 157 nm 露光装置の受注を最終的に 193 nm 露光装置に切り替える顧客対応等で早々に処理してしまった。ASML 社、さらには、Carl Zeiss 社、Schott 社などの研究開発資金が公的な資金に多くを依存しており開発の中止に伴う後遺症は軽微とされている点にも注目しておかなければならない。

F2 157 nm の開発の中止では、IMEC のすばやさも際立っている。SVGL Micrascan VII(2003.4 の出荷)も数ヶ月稼働しただけで、撤去する決断である。この点でも ASML 社の負担は軽減されている²³, [26], [27]。

4.5 ASML 社の躍進 - 半導体装置メーカーの頂点へ -

今日、最先端露光装置は、NA 1.35 の 193 nm ArF 液浸露光装置である。NA 1.35 は 193 nm における純水の屈折率 1.44 で実現可能な NA の限界に位置する。いち早く NA 1.35 を出荷した ASML 社が市場を席卷した。ここに至って露光装置メーカーの優劣が確定したかに

²³<http://www.takeda-foundation.jp/reports/pdf/prj0103.pdf>

見える。NA 1.30 で対抗できずに遅れて NA 1.35 を投入した Nikon 社は、残念ながら劣勢を挽回できていない。Canon 社は更に凋落し、液浸露光装置のビジネスが成り立っていない。2011 年の半導体装置サプライヤのトップに ASML が躍り出ている。

5. 失敗に終わった F2 157 nm

F2 157 nm リソグラフィの延命の検討から液浸が始まり、ArF 193 nm 純水液浸リソグラフィが実現した。ArF 193 nm 純水液浸の次の世代は NA 1.35 の壁を打ち破る超高 NA 液浸とされ、高屈折率材料開発が進められた。超高 NA 液浸の実現は硝材、液浸液、レジストの三要素 CaF₂、純水、ArF_CAR 全てを新たな高屈折率材料で置き換えて初めて実現される。第二世代 NA ~1.55、第三世代 NA ~1.70 に向けて、共晶、Nano Particle に至る材料まで探索されたが材料開発の壁は越えられなかった。2007 年を過ぎると DP が、32 nm、22 nm 世代の技術になっている。ArF 193 nm 超高 NA 液浸に展望が拓けなくなりさらに厳しい F2 157 nm 液浸も完全に舞台から消えた。厳しい F2 157 nm の要求が鍛えてきた技術は生きている。合成石英の品質、ページにかかわる技術、さらに F2 157 nm Catadioptric 光学系の検討が ArF 193 nm NA>1.0 の設計に引き継がれたことも容易に推察される。

IBR の設計制約のみならず大口径 CaF₂ の製造問題を抱えていた F2 に比べて、確立していた硝材、レーザ光源、マスク、レジスト、さらにペリクル技術が使える ArF のインフラが短期の ArF 液浸開発に結び付いた。

もっとも大きな違いは、F2 は透明材料、液浸は液浸欠陥が鍵となった点である。硝材 CaF₂ の開発は出発材料の精製、結晶成長(Czochralski 法)という数ヶ月を要するサイクルである。大口径化でさらに期間が増す。白金るつぼは高価で開発段階でも設備投資負担は重い。F2 157 nm 露光装置の量産に対応する為にはさらに巨額の設備投資が求められる。開発に成功しても大口径 157 nm レンズ仕様の CaF₂ には他の用途が無く、F2 157 nm から次のリソグラフィ技術に移行した段階で市場は収縮する。対して液浸欠陥は欠陥検査装置が制約であったが日の単位で実験サイクルが回った。この開発サイクルの違いは 2002 年 SPIE からほぼ一年で液浸が本命視され、2003 年には実験機が登場し、矢継ぎ早に既存の露光装置を改造した実験機が欠陥検査装置を有する顧客に提供され、多くのレジストメーカーが参画できた点でも際立っている。液浸欠陥の低減は加速され、一年足らずで二桁改善されている。

言い方を変えれば、F2 は科学の世界で、液浸はエンジニアリングの世界ではなかったのかと考える。液浸への流れの全ては純水を選択した時点で決まっていたのかもしれない。

ArF 193 nm 液浸の開発では純水を選択が決定的な役割を果たした。特徴を整理しておく。

1. 屈折率 1.44(at 193 nm)は 134 nm 相当。NA 1.35 が得られる。
2. 表面張力。
3. 蒸気圧。

4. 純水処理技術が使える。純度、脱気・脱泡。
5. コスト、安全。排水(廃液)に障害はない。
6. 撥水技術。(トップコートは既に CAR で実績。)
7. 高 NA の本命 Catadioptric 光学系は F2 開発で検討していた。

水の表面張力、撥水が無ければ Local Fill の実現性はなかった。

結局、F2 157 nm は Intel 社が加速に働き SEMATECH を動かし、Intel Peter Silverman が 2003 年 5 月に Intel 社の 45 nm node のロードマップから外すと公言して F2 157 nm を終わらせてしまったとも見える。結果的には非常に賢明な判断でありこの Intel 社の動きがさらに ArF 液浸の開発を加速した。動きの鈍かった SEMATECH も、2003 年に効率的に Meeting を開催して液浸への流れを作った。ArF 液浸開発では、Local fill concept を打ち出した Nikon 社に勝機があったのではないかと考える。液浸露光装置のプラットフォームの基本となった機構の提案であり Local fill concept 無しでは今日の液浸は有り得なかった。

6. おわりに

本稿の主題を F2 と ArF 純水液浸に置いた。何故 F2 が登場できなかったのか、何故 ArF 液浸が純水を得て成功したのか、開発の流れを追って考察した。Hard ペリクルの開発が頓挫した為欠陥のレベルは判然としないが、IMEC、Selete でのプロト機のデータで F2 の転写性能を検証できた。Selete が BEOL プロセスの開発に適用した実績は、レジスト開発があるレベルまで達成できたことを物語っている。筆者は、F2 が登場しなかったことよりも終息に課題があったと考えている。また、液浸技術開発では、顧客を取り込む仕組みが働いた。液浸欠陥対策は、露光装置と材料・プロセスの”Total solution”であり、開発段階で用いられた露光装置の機構・機能との組み合わせに制約され、他社の露光装置を導入するにはリスクを伴い、露光装置購入を一社に集約する結果を生んだと推察している。積極的に多くの実験機を提供し、多くの顧客と欠陥対策を進めた ASML の戦略が、Nikon、Canon を圧倒したのではないだろうか。AMAT 社の導入もその典型と考えられる。2001 年から 2004 年の期間、Nikon と ASML/Carl Zeiss が特許で争っていたことも技術開発競争と共に考える必要がある。2004 年には、”cross-license”と 1 億 4500 万ドルの和解金を Nikon が得る形で決着しているが、その後の ASML の躍進を止めることは出来ていない。液浸露光装置の開発で実を得たのは ASML だった。(Canon とは 2007 年に”cross-license”に至っている。)

SEMATECH、ANT、IMEC、Selete を比べると唾然となる。ANT は 2004 年 8 月 AT:1150i、IMEC は数か月後 12 月に TWINSCAN XT:1250i を入れている。IMEC は 2004 年 9 月には TEL と液浸に関わるコラボレーションを始め、F2 露光プロセス開発の IIAP プログラムを ArF 193 nm 液浸プログラムに切り替えている。日本からは松下、ソニー、NEC が参加し

ている。SEMATECH も Exitech、Amphibian Systems の装置を導入して開発している。しかし、Selete では、液浸に関わる開発は出来ていない。2001 年に始まった Selete 第二期 F2 開発計画に引きずられている。IMEC、SEMATECH の F2 の終息は素早い。

ITRS Roadmap だけでなく、Intel の公開する Intel Roadmap も影響力が大きい。Intel は ITRS の主で有るだけでなく、Intel Roadmap の公開を戦略的に実施し技術開発を誘導している。SEMATECH のコントロールも出来ている。巧みな誘導は EPL、EUVL から F2 への切り替えを促し、SEMATECH のプログラムに加えて、SEMATECH 主催の Workshop、Symposium を働かせた。液浸では、2002 年の Workshop で"Top ten issues"をリストし、Resist、Bubbles、Fluids Properties の三つの Task Force を走らせ 2003 年の Workshop で"no critical issues"と纏め液浸への流れを鮮明にした。その間、SPIE AL を経て Intel Roadmap から F2 157 nm (@45nm, 2007)を外すメッセージを関係者に発信している。デバイスの特徴が Intel の戦略をさらに巧妙にしている。Logic デバイスは冗長回路救済が困難で欠陥のレベルは Flash>>DRAM>>>CPU の順で厳しい。Intel は液浸欠陥の低減を自社で進めるとともに Flash、DRAM メーカーが生産現場で習熟されていく技術を把握して液浸技術の導入を見極める。

次世代リソグラフィ技術の選択に於いては常に解像性能が重視される。縮小投影露光の解像限界は二光束干渉条件 $k_1=0.25$ で計算される理論値を超えることは出来ない。波長と NA で容易に予測が出来た。液浸の延命は既に無いが、DP/MP を液浸の延命の範疇とするならば、EUVL が登場すれば、Dry → Wet → Vacuum と技術の流れを説明することになるのかもしれない。

デバイスメーカーの寡占化とともに露光装置メーカーが淘汰されてきた。しかし、過去、新たな技術領域に踏み込む都度、既存技術を席卷する都度露光装置メーカーの交代が演じられている。縮小投影露光に代わる NGL の登場がある時、また覇者が変わるのではないだろうか。

NGL の登場以前に 450 mm が始まっている。Foot print という視点では TWINSCAN Platform の単純延長は負担が重い。Nikon が開発した Tandem stage のコンパクトさに期待したい。巨額の開発投資を要求される 450 mm に失敗は許されない。

科研費プロジェクト：「産学官連携によるイノベーション過程の研究」に携わる機会を得て 2000 年前後の次世代リソグラフィ技術開発の置かれた状況を調査した。半導体の歴史はリソグラフィの歴史でもある。デバイスでは Moore's Law の終焉が囁かれている。リソグラフィはコンタクト、プロキシミティ、縮小投影露光と進み、縮小投影露光は g 線、i 線、KrF、ArF と短波長化を成し、Stepper、Scanner、Immersion Scanner とプラットフォームを進化させて対応した。2007 年に ArF 193 nm 液浸露光装置が NA 1.35 の限界に達してから DP、MP が Moore's Law を維持してきた。DRAM、NAND Flash に代表される Charge がビット情報を記憶する Memory の限界も近いとされる。技術が揃わなければ次世代に移

行出来ない。デバイスビジネスを取り巻く状況は激変している。規模拡大・寡占化の時代の先は見えない。F2 157 nm 開発が頓挫し ArF 193 nm 液浸が純水で陽の目を見た。そこには開発を加速した情報の流れと共通認識の醸成が働いた。加速は F2 157 nm を見切ることでも得られた。ITRS の Roadmap に見られるように常に技術を網羅して候補を挙げ、評価し、Roadmap を更新し続けるサイクルが Moore's Law を支え続けてきた。F2 は外れた段階で処理の俊敏さが問われた。世代を支えるリソグラフィ技術の主役は常にひとつに集約されていく。多くの情報の中から同業他社の選択肢を見極める力が問われる。

最後に 本プロジェクトに参画し推敲の機会を与えて頂きましたことを感謝いたします。

参考文献

- [1]. "CRAMMING MORE COMPONENTS ONTO INTEGRATED CIRCUITS", ELECTRONICS MAGAZINE 19 APRIL 1965
- [2]. "CRAMMING MORE PROGRESS IN DIGITAL INTEGRATED ELECTRONICS", 1975 IEEE, IEDM TECH DIGEST P. 11-13
- [3]. "Chronology of Lithography Milestones", Version 0.9 May 2007, by Atsuhiko Kato, (http://www.lithoguru.com/scientist/litho_history/Kato_Litho_History.pdf)
- [4]. "半導体露光装置に見られる競争力弱化的構図：ASML の躍進とニコンの苦戦に学ぶ"、一橋大学イノベーション研究センター、中馬宏之 (2012/5/21)
- [5]. "半導体製造装置産業の現状分析"、第 49 巻 第 5 号 『立命館経営学』(2011 年 1 月 97)、論 説、肥塚 浩
- [6]. "露光装置技術発展の系統化調査"、高橋 一雄、国立科学博物館産業技術史資料情報センター、Vol. 6 2006 March
- [7]. "「すり合わせ型」と「組み合わせ型」ものづくりの共進化 ー半導体露光装置メーカー・ASMLの事例からー"、早稲田大学大学院アジア太平洋研究科 国際経営学 MOT専修 丹羽哲也、(2005-2-4)
- [8]. 赤門マネジメント・レビュー 9 巻 8 号(2010 年 8 月)
- [9]. SEC File 0-11348 (Filed On 12/26/95) Accession Number 891618-95-765 (<http://www.secinfo.com/dr6nd.aNy.htm>)
- [10]. "DoD 1995 report: Report No. 95-148, March 15, 1995 "
- [11]. T. M. Bloomstein, M. W. Horn, M. Rothschild, R. R. Kunz, S. T. Palmacci, and R. B. Goodman, "Lithography with 157 nm lasers", J. Vac. Sci. Technol. B 15, 2112 (1997), From 41st ICEIPBTN, International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication, May 27-30 1997, Dana Point, CA
- [12]. Burnett et al., "Intrinsic Birefringence in 157 nm Materials," National Institute of Standards and Technology, Sematech Calcium Fluoride Birefringence Workshop,

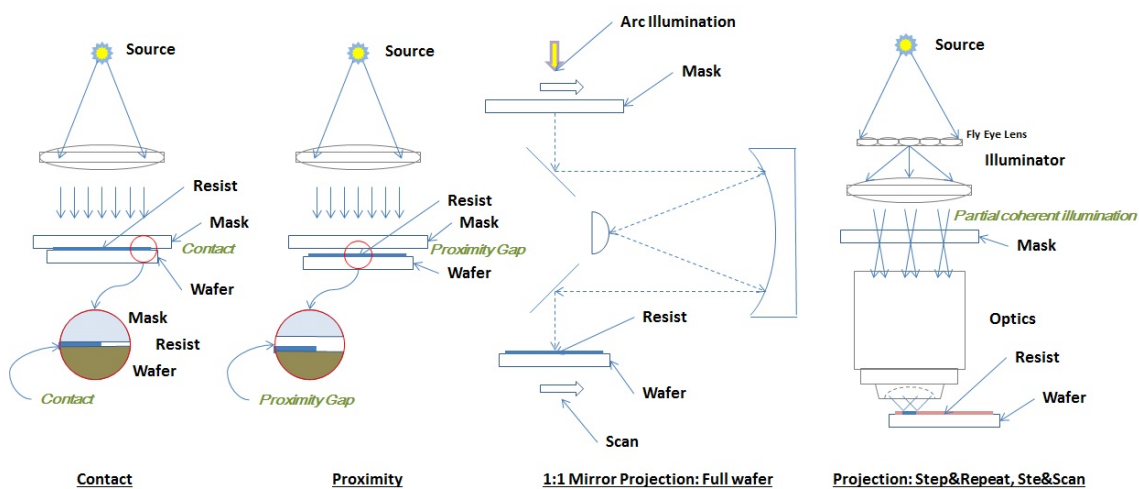
Jul. 18, 2001

- [13]. John H. Burnett, "Stress-Optical Coefficients of 157 nm Materials", (SEMATECH 157 nm Technical Data Review, 11 December 2001)
- [14]. 笹子勝 (ASET 横浜研セ), "VUV レーザーリソグラフィ (VUV Laser Lithography),"応用物理学会学術講演会講演予稿集 巻 : 58 号(1997 年 10 月)
- [15]. M.Sasago, "Lithography Solution for 0.1u Generation", in IEEE Proc. Int. Electron Devices Meet. p578 (1997)
- [16]. Lin, B. J., "Semiconductor Foundry, Lithography, and Partners", Proc. SPIE 4688, 11-24 (2002), From Conference Volume 4688 Emerging Lithographic Technologies VI, Santa Clara, CA | March 03, 2002
- [17]. Switkes, M. and Rothschild, M., "Immersion Lithography at 157 nm," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 19, No. 6, pp. 2353-2356, (Nov. 2001). From ICEIPBTN: 45th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology and Nanofabrication Washington, D.C., May 29-June 1, 2001 Washington, DC
- [18]. Switkes, M. and Rothschild, M., "Resolution Enhancement of 157 nm Lithography by Liquid Immersion", Proc. SPIE 4691, 459-465 (2002), From Conference Volume 4691 Optical Microlithography XV, Santa Clara, CA | March 03, 2002
- [19]. S. Owa, et al., "Nikon F2 Exposure Tool", 3rd International Symposium on 157 nm Lithography, September (2002).
- [20]. B. J. Lin, "Drivers, Prospects, and Challenges for Immersion Lithography", 3rd International Symposium on 157 nm Lithography, September (2002)
- [21]. S. Owa and H. Nagasaka, "Immersion lithography; its potential performance and issues", Proc. SPIE 5040, (2003).
- [22]. Switkes, M., et al., "Immersion Lithography: Optics for the 50 nm Node", 3rd International Symposium on 157 nm Lithography, September (2002)
- [23]. Suwa, K., "Focusing and tilting adjustment system for lithography aligner, manufacturing apparatus or inspection apparatus", United States Patent 5,825,043, filed in 1996, (1998).
- [24]. Fukami, Y. and Magome, N, "Projection exposure method and system", International Patent Application, WO99/49504, PCT/JP99/01262, applied in 1998, (1999).
- [25]. Soichi Owa, Hiroyuki Nagasaka, "Immersion lithography: its history, current status and future prospects", Proc. SPIE. 7140, Lithography Asia 2008 (November 20, 2008)
- [26]. 「(財) 武田計測先端知財団 IMEC 2008/9/9 第 3 章 IMEC (Interuniversity Microelectronics Center) -世界の半導体企業にとって魅力ある独立研究機関

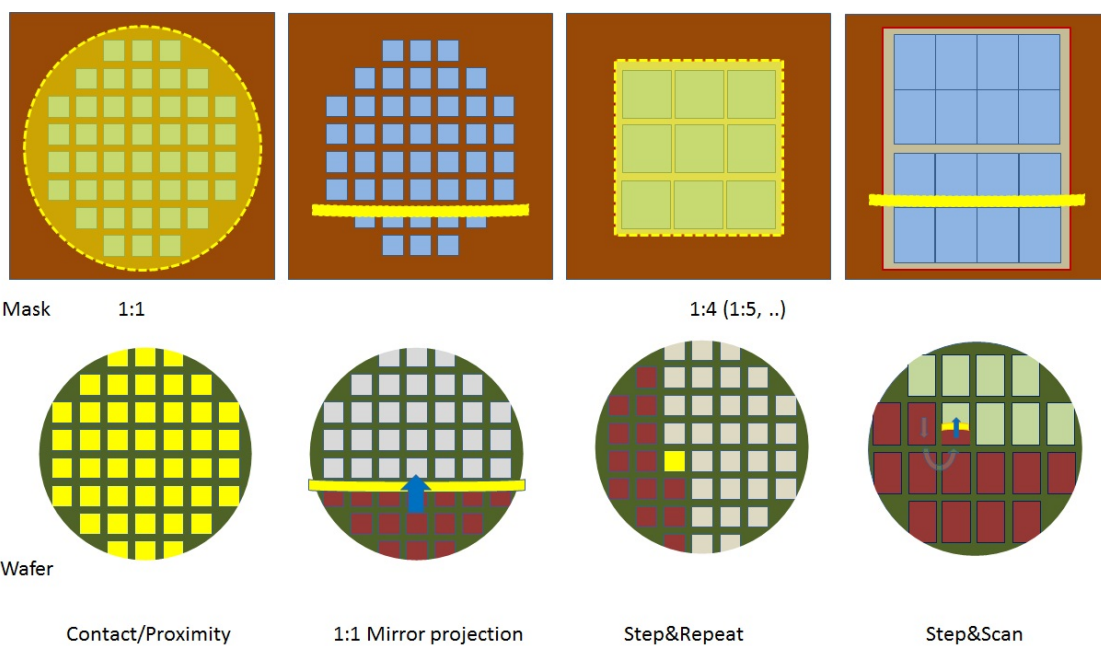
ー」 <http://www.takeda-foundation.jp/reports/pdf/prj0103.pdf>

- [27]. 国立科学博物館 HP 産業技術史資料情報センター 「露光装置技術発展の系統化調査」
- [28]. USP 4346164 “Photolithographic method For The Manufacture Of Integrated Circuits”, Filed Oct. 6, 1980, Werner Tabarelli et al. (Liechtenstein)

補足 1 露光方法: コンタクト、プロキシミティ、プロジェクション



[1] 露光装置光学系概念図



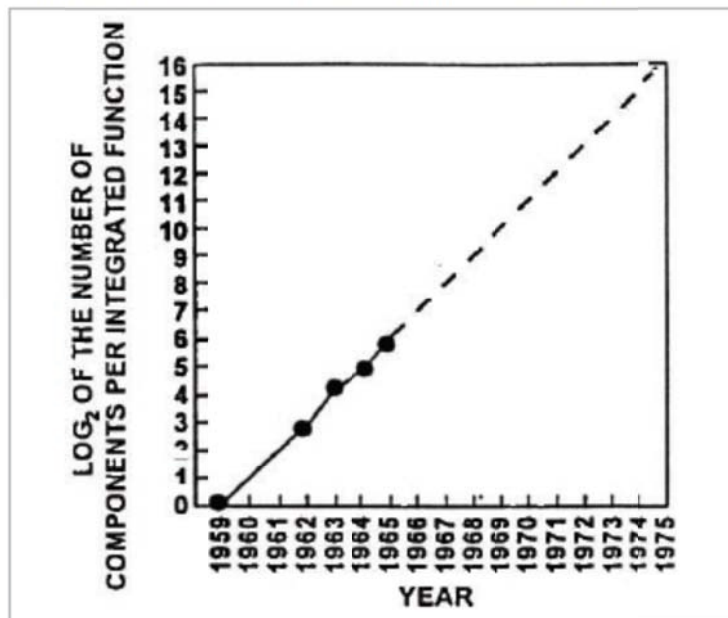
[2] マスク照明領域形状とウエハでの露光方法 (一括、スリットスキャン、Step&Repeat、Step&Scan)



[3] 露光装置例 ASML 社 <http://www.asml.com/>

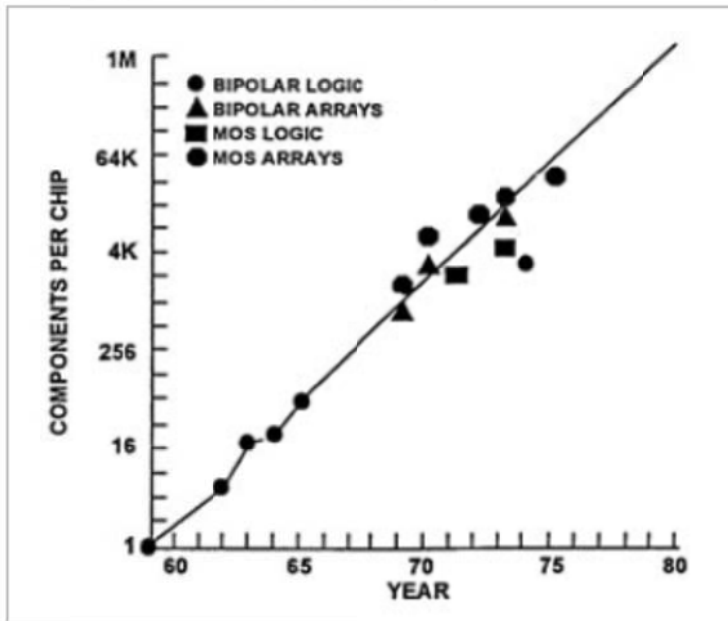
補足 2 Moore's Law

Figure 2 The original "Moore's Law" plot from Electronics April 1965.



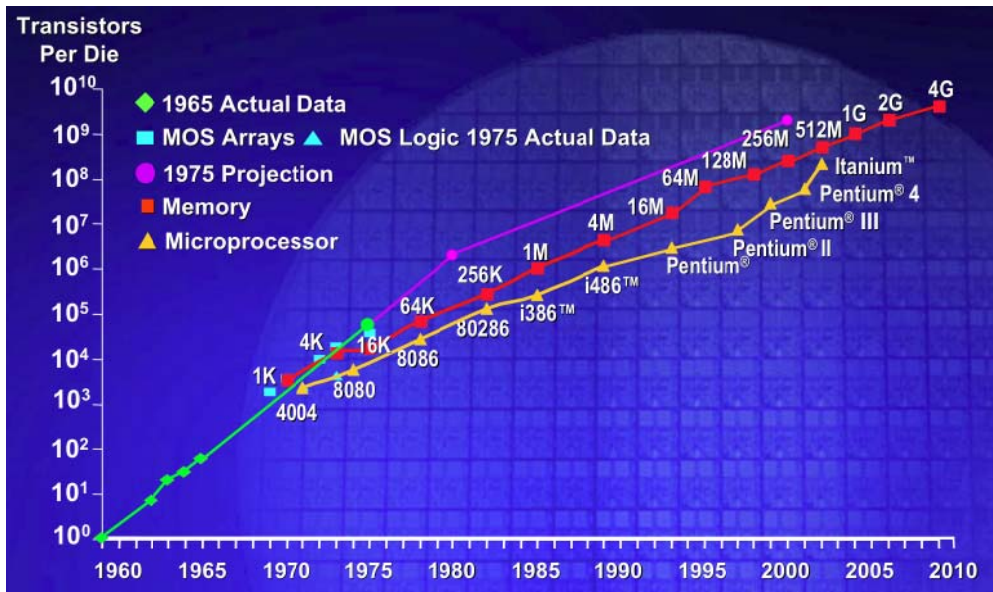
[1]. "CRAMMING MORE COMPONENTS ONTO INTEGRATED CIRCUITS", ELECTRONICS MAGAZINE 19 APRIL 1965

Figure 5 Approximate component count for integrated circuits introduced up to 1975 compared with the prediction of the most complex circuits from the original Electronics paper (Figure 2).

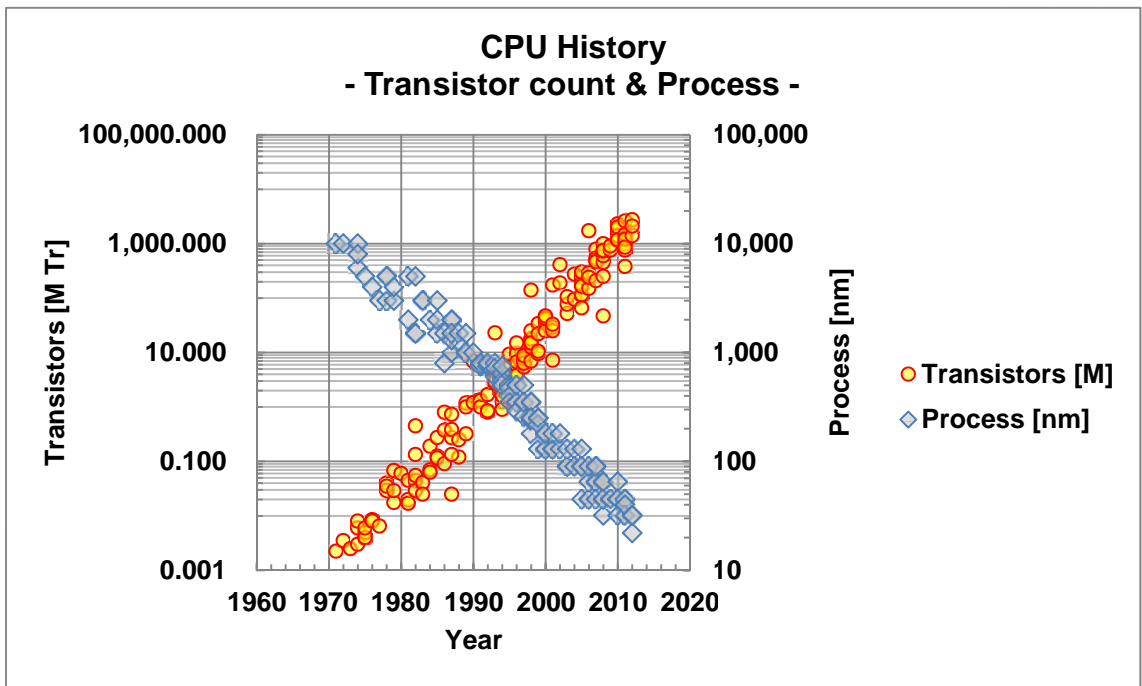


[2]. "Cramming more Progress in Digital Integrated Electronics", 1975 IEEE, IEDM Tech Digest p. 11-13

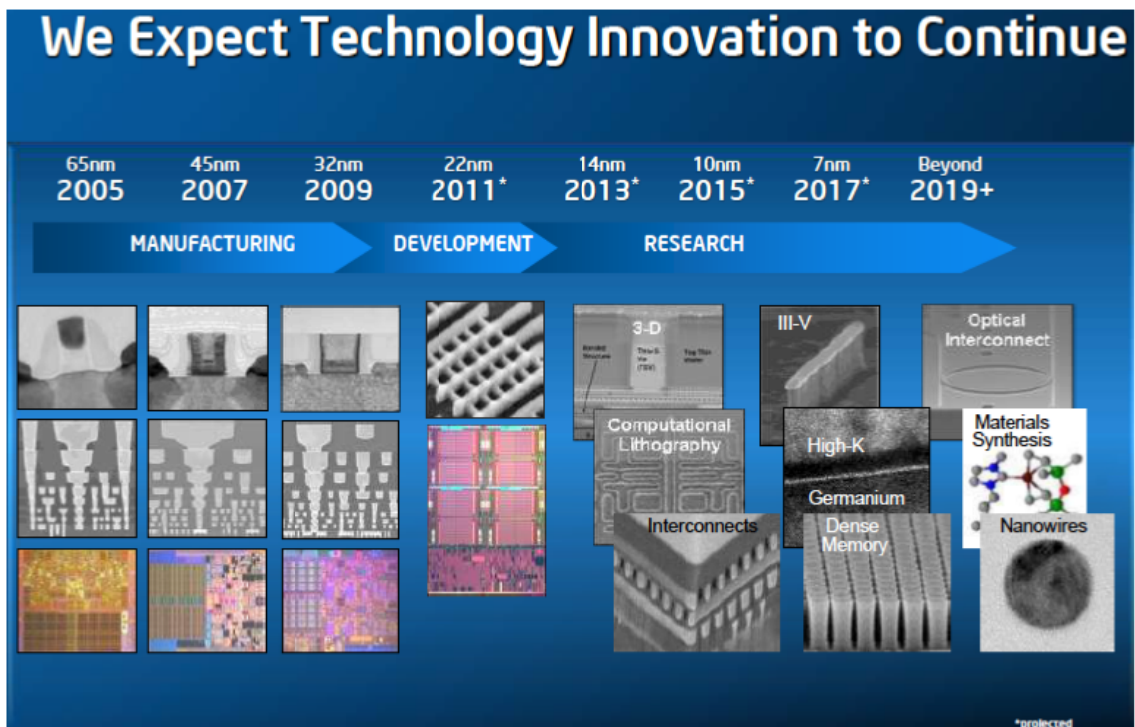
[3]. "Lithography and the Future of Moore's Law", Proc. SPIE Vol. 2437, May 1995



[4]. ftp://download.intel.com/research/silicon/Gordon_Moore_ISSCC_021003.pdf



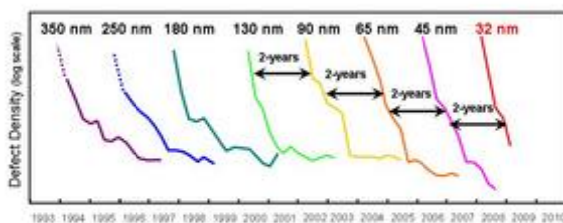
[5]. CPU Tr 数、プロセス微細化の歴史 (公開情報をもとにグラフを作成)



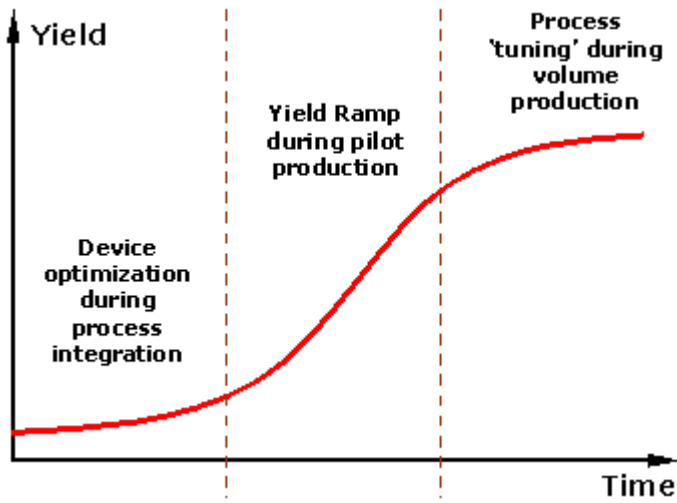
[6]. <http://forum.hardmac.com/index.php?showtopic=10452>
(& http://download.intel.com/newsroom/kits/22nm/pdfs/22nm-Details_Presentation.pdf)



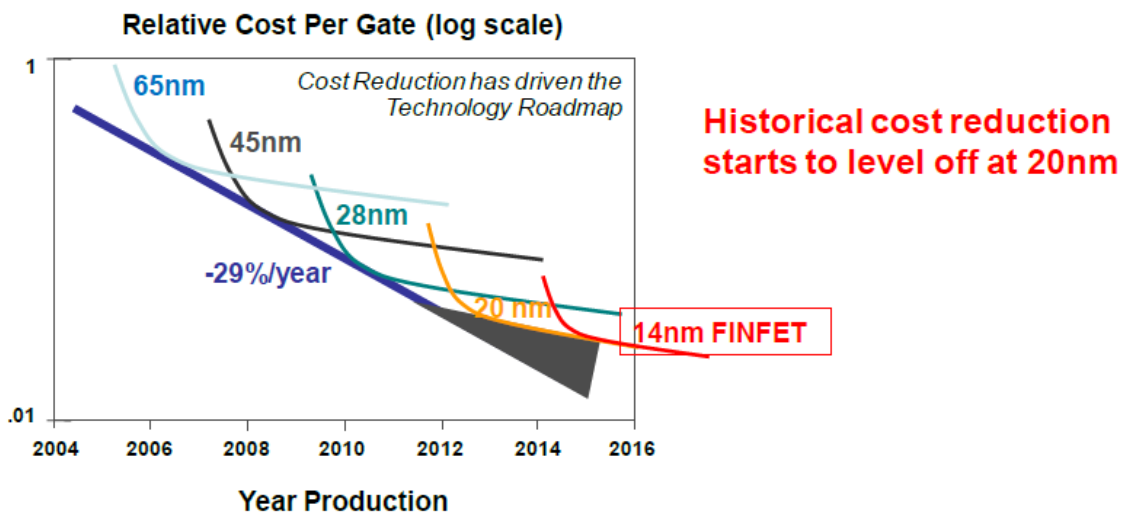
[7]. Source Intel: Intel Tick Tock



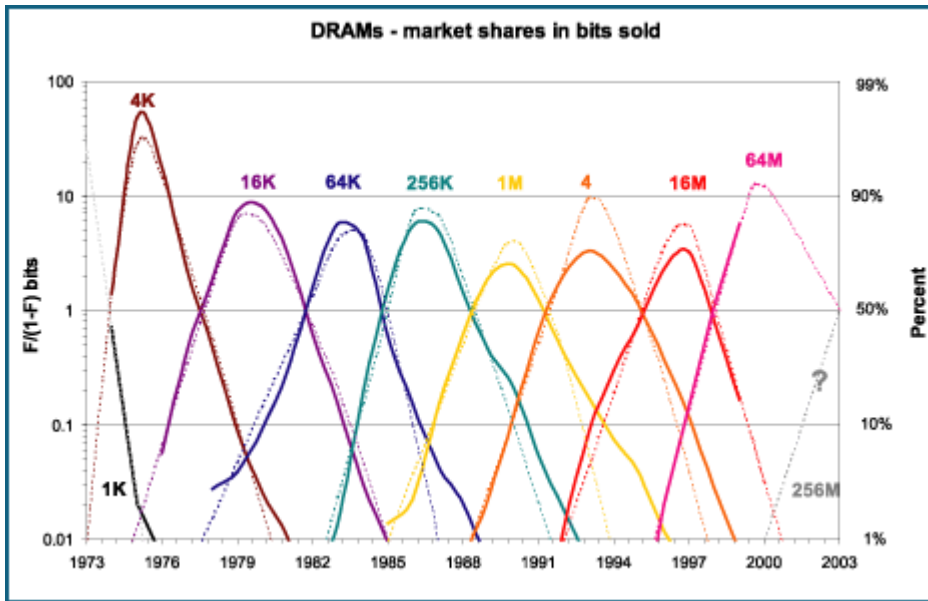
[8]. Source Intel, <http://www.anandtech.com/show/2161/4>
http://maltiel-consulting.com/Silicon_Technology-Intel_32nm_Microprocessor_System-on-Chip_SOC.pdf
<http://www.intel.com/content/dam/doc/technology-brief/32nm-logic-high-k-metal-gate-transistors-presentation.pdf>



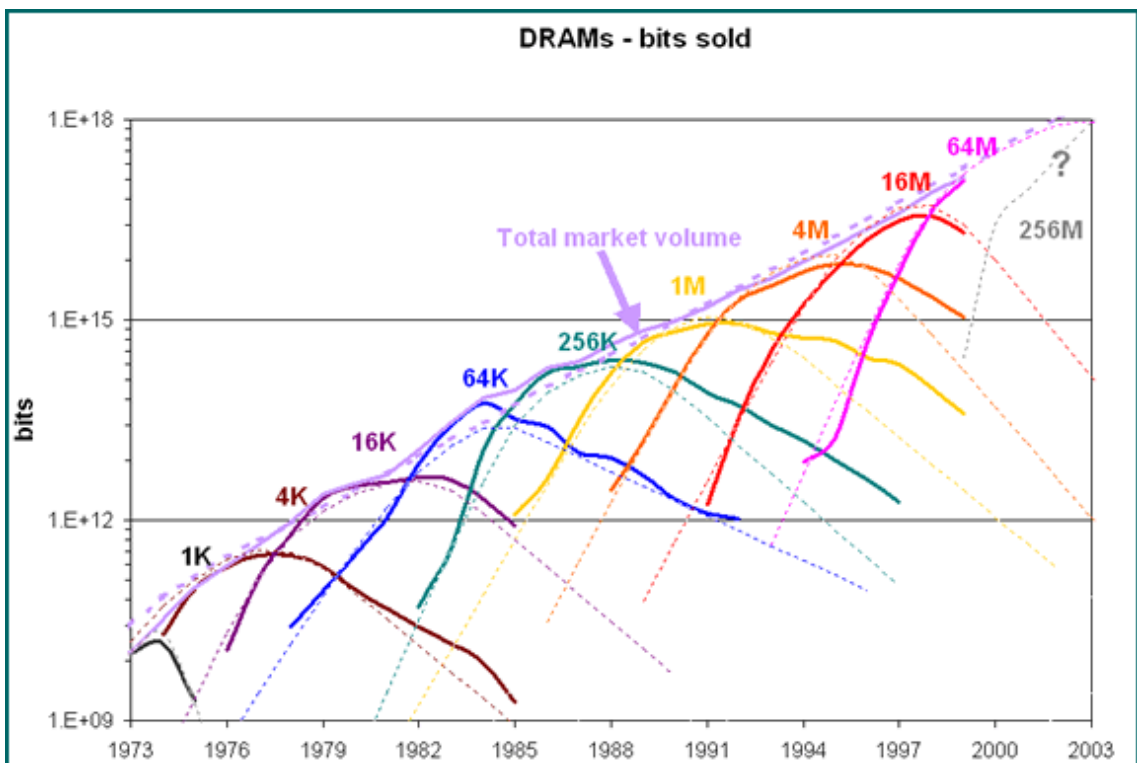
[9]. ITRS/EEetimes: fig. 1. Industry has traditionally partitioned process development and yield improvement into three phases.



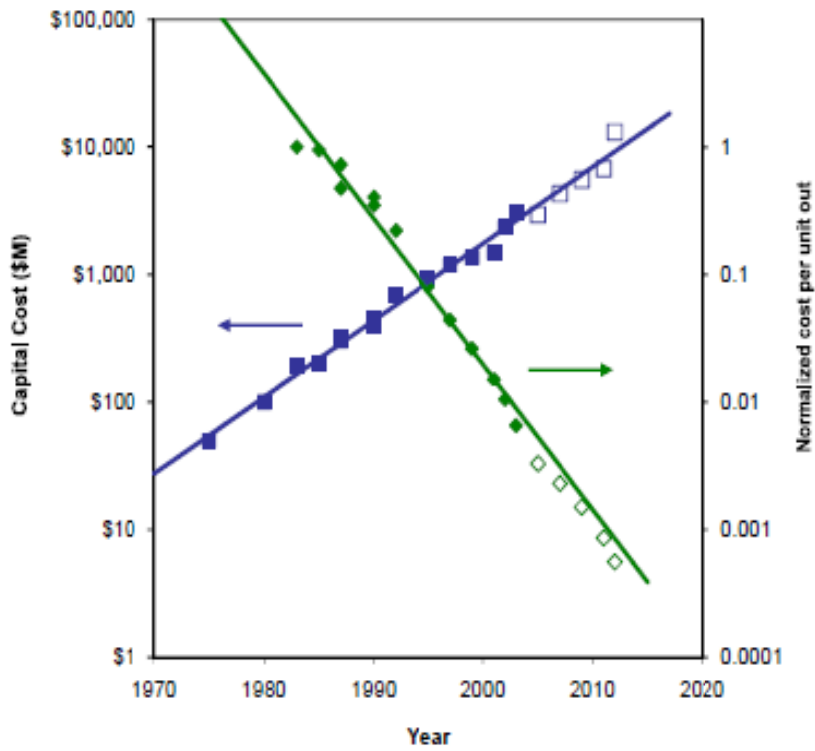
[10]. Source ITRS: www.itrs.net/



[11]. http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/Research/Understanding_the_dynamics_of_/DRAM_4/dram_4.html

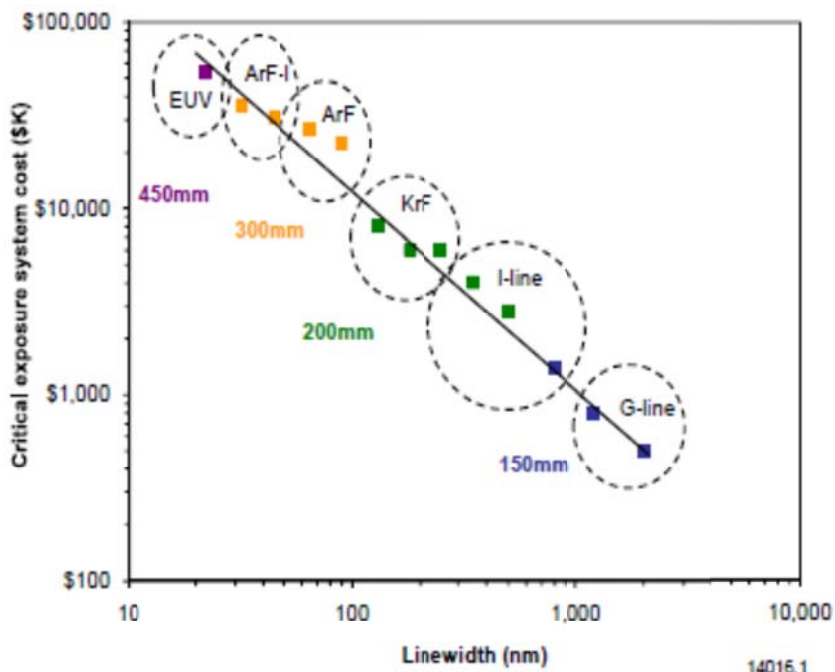


[12]. http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/Research/Understanding_the_dynamics_of_/DRAM_5/dram_5.html



14012.3

Copyright © 2000-2008 IC Knowledge

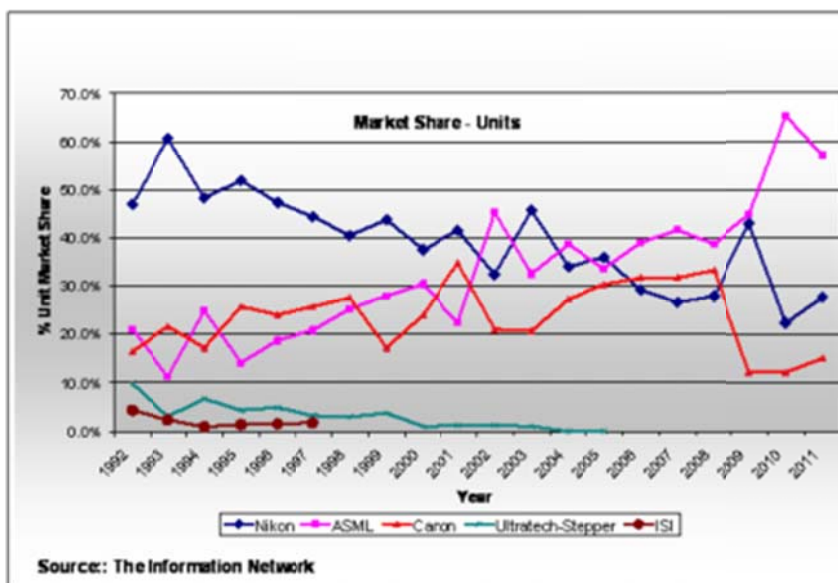


14016.1

Copyright © 2000-2008 IC Knowledge

[13]. Source IC Knowledge:

<http://www.icknowledge.com/news/Economics%20of%20the%20ITRS%20rev%2001.pdf>



(注 台数ベースのグラフである。)

[14]. <http://www.siliconsemiconductor.net/article/74993-Can-Nikon-or-Canon-Ever-Catch-ASML-in-the-Lithography-Market.php>

ASML's growing market share



Sources: VLSI, Gartner (1988-2009), SEMI (1980-2009)



Source: ASML, SEMI
Slide 5 |

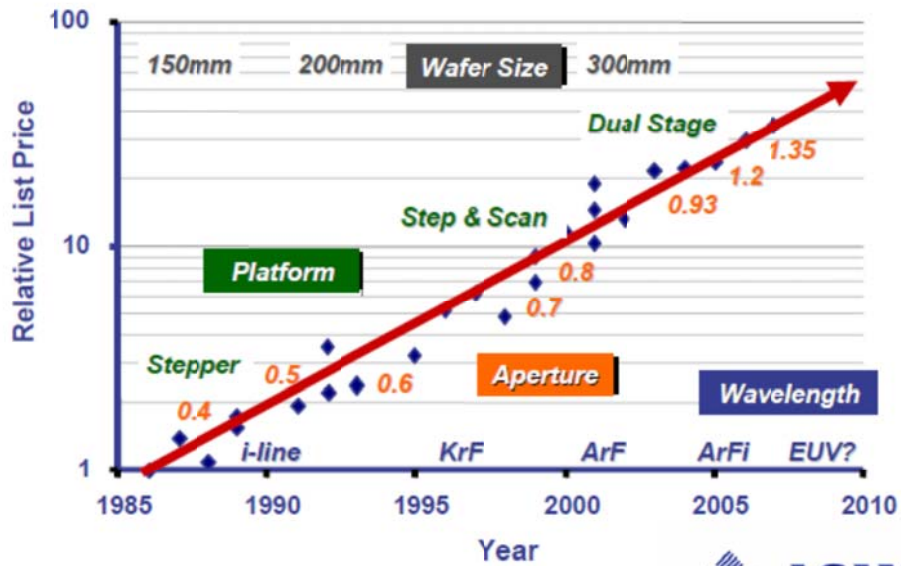


Public



[15]. http://www.asml.com/doclib/investor/presentations/2010/asml_20100512_2010-05-12_DB_Singapore_Conference.pdf

Lithography System costs will continue to rise



/ Slide 13



[16]. Bank of America, 37th Annual Investment Conference, San Francisco, CA, Craig DeYoung, VP Investor Relations, September 18, 2007

補足3 F2 157 nm の抱え続けた課題

1. F2 157 nm は EPL、EUVL などの開発に展望が拓けずに浮上したこともあり、もともと開発期間に余裕がなかった。
2. F2 157 nm は ITRS2002 時点では 65 nm 一世代限りの技術であった。
3. ArF 193 nm 水液浸は 134 nm 相当であり、F2 157 nm Dry に比べて微細化限界が伸びる。
4. ArF 193 nm 液浸には純水に続く高屈折率液体の採用による延命の可能性があった (NA>1.35: 193 nm 超高 NA 液浸)。対して、純水の透明度の問題から F2 157 nm 水液浸は無かった。
5. F2 157 nm では、透明材料が乏しい。材料開発は時間がかかる。挫折するリスクがある。(純水液浸延命で取り組まれあつた高屈折率材料探索も同類)
 - ・ CaF₂ 透明度、照射耐性、大口径化
 - ・ CaF₂ IBR
 - ・ ペリクル材料
6. CaF₂ は結晶で非晶質の石英に比べて面精度が出なかった。研磨技術開発が必要になったが、収差・フレアレベルの達成に難課題があつた。
7. パージ、コンタミネーション対策が ArF に比べて桁違いに厳しかった。
8. 157 nm レーザの狭帯域化がパワーと両立せず Catadioptric 光学系が新たに必要であつた。そこに IBR 対策の設計変更が入つた為開発に遅延が生じた。

補足2 略語

- ・ ANT/CNSE Albany Nanotech/College of Nanoscale Science and Engineering
- ・ ASPLA Advanced SoC Platform Corporation (ASPLA)
- ・ CAR Chemically Amplified Resist (CAR)
- ・ CoO Cost of Ownership
- ・ DARPA Defense Advanced Research Projects Agency
- ・ DoF Depth of Focus
- ・ DP/MP Double Patterning/Multiple Patterning
- ・ EIAJ Electronic Industries Association of Japan 日本電子機械工業会 (EIAJ)
- ・ EIPBN EIPBN, the “3-Beams”, Conference
- ・ EPL Electron-beam Projection Lithography (EPL)
- ・ EUVL Extreme Ultra Violet Lithography
- ・ HALCA 高効率次世代半導体製造システム技術開発 (Highly Agile Line Concept Advancement) 東北大学 未来科学技術共同研究センター
- ・ i SEMATECH International SEMATECH

- I300I International 300 mm Initiative (I300I)
- IBR Intrinsic BiRefringence (IBR)
- ILT Inverse Lithography Technology (ILT)
- IMEC Inter-University Microelectronics Center
- ITRS International Technology Roadmap for Semiconductors
- J300 an alliance of five Japanese trade groups (JEIDA、JSNM、SIRIJ、EIAJ、SEAJ)
- JEIDA Japan Electronic Industry Development Association 日本電子工業振興協会
- JEITA Japan Electronics and Information Technology Industries Association 一般社団法人 電子情報技術産業協会 (JEITA)
- JSNM Japan Society of Newer Materials 社団法人新金属協会
- MIRAI 半導体MIRAIプロジェクト(Millennium Research for Advanced Information Technology) 独立行政法人産業技術総合研究所
- ML2Mask Less Lithography
- NA Numerical Aperture
- NEDO NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
- NGL Next Generation Lithography
- NIST 米国商務省の R&D 担当機関である国立標準規格技術研究所 (National Institute of Standards and Technology)
- NTRS National Technology Roadmap for Semiconductors
- OPC Optical Proximity Correction
- PREVAIL PREVAIL - Projection Reduction Exposure with Variable Axis Immersion Lenses、IBM
- PSM Phase Shifting Mask
- SCALPEL Projection Electron Lithography (SCALPEL) The SCattering with Angular Limitation Projection Electron-beam Lithography (SCALPEL) 、Bell Lab.
- SEAJ Semiconductor Equipment Association of Japan 社団法人・日本半導体製造装置協会 (SEAJ)
- Selete 株式会社半導体先端テクノロジーズ Semiconductor Leading Edge Technologies, Inc.(Selete)
- SEMATECH SEMiconductor MANufacturing TECHNOlogy
- SEMI Semiconductor Equipment and Materials International
- SIA Semiconductor Industry Association 米国
- SIRIJ Semiconductor Industry Research Institute Japan (SIRIJ)

- SPIE/ SPIE AL SPIE Advanced Lithography Symposium The Society of Photographic Instrumentation Engineers
- SRAF SRAF(sub resolution assist features)
- STARC 株式会社半導体理工学研究センター (Semiconductor Technology Academic Research Center)
- WSC 世界半導体会議 (WSC: World Semiconductor Council)