

第1章 超 L S I 共同研究所* — 共同研究所の元祖

(VLSI Cooperative Laboratories)

超 L S I 共同研究所は 1976 年から 1980 年の約 4 年間 川崎市宮崎台に開設された。この研究所の最も特徴とする所は複数のライバルメーカー、この場合、富士通、日立、三菱、日電、東芝の各社から平均 20 名ずつの研究員が一箇所に経常的に 4 年間集まって実質的な研究を行った所にある。このような共同研究は洋の東西を問わず初めての試みで、この研究所の成功によって、世界的にこの種の形式の研究所方式が多く採用されることとなった。

この研究所の代表的な成果は電子ビーム描画装置と光学的ステッパの開発で、両者共に過半数の世界的シェアを得ると共に、その他の成果と総合して 1980 年代の日本の半導体産業の興隆期をもたらしたと考えられる。

以下に この研究所が 如何にして作られ、如何に運営され、如何なる成果を生んだかについて述べ、その成功の要因を伝えようとするものである。

1. 超 L S I 共同研究所の始まり

1.1 スタートまでに

当時 L S I は日本では民需要にその道を見出し、電卓用 L S I の開発に成功していた。一方インテル社が 1970 年に開発した DRAM は段々と普及が進んで、最初の 1 K ビットから 4 K ビットへと進化し、インテルを始め国内各社も 4 KDRAM の生産を拡大しつつあった。

なぜ超 LSI が浮上してきたか？一つには上に述べたような LSI の将来の方向としての見通しもあったと思われるが、実はもっと直接的な動機があったようである。その一つは I B M の独占禁止法の裁判で I B M の将来計画が明らかにされ、その内に次世代コンピュータとしてのフューチャーシステムと云う言葉

* 後に述べるように正式名称は超エルエスアイ技術研究組合共同研究所であるが簡略化のためこの名称を使わせていただいた。

があり、これに高集積メモリを使う記述があったと云うのである。いま一つは当時の電々公社の副総裁が IBM を訪問した際、1 メガビットの DRAM を見せられたと云う噂が広まったことである。しかし、後になって、当時 IBM と云えども 1 メガビット DRAM は出来ている筈はなく、見せられたのはバブルメモリだったのではないかと云うことになってはいる。

しかし、この2つの事実は 80 年代のコンピュータが完全に IBM に押さえられてしまうのではないかと云う懸念を国内にまきおこした。これとは別に日本電子工業振興協会 (JEIDA) に昭和 49 年 (1974 年) 春に設けられた電子材料マネジメントボードにおいても提案がなされている。このボードの委員長は田中昭二東大教授(当時)で、適切な国家プロジェクトのテーマ提案がまとめられた。提案されたプロジェクトは約 10 テーマであったが、その筆頭が「極限型 LSI」であり、これは超 LSI に対応するものである。この提案は同年 6 月に通産省(当時)に提案されている。その後秋頃になって前記の IBM のニュースなども入り始めたので田中教授は 12 月 25 日に急遽「超高性能 LSI の開発について」と云う文書を JEIDA のマネージングボードに提出したと云う。これを元に昭和 50 年 (1975 年) に入って JEIDA に LSI 検討会が設けられ、微細加工などを関係企業が協力して研究することが検討され、その検討結果が通産省に提案された。想定された構成企業は汎用コンピュータを生産していた富士通、日立製作所、三菱電機、日本電気、東芝の五つの会社であり、これらが通産省の補助金を得て超 LSI 技術を研究開発しようとするものである。しかもこの計画には、日頃はライバル関係にある五社の研究者を一箇所に集めて、実質的に研究を行うという当時としては破天荒な共同研究所を作ると云う案が含まれていたのである。

通産省ではこれを受け、同年 10 月から始めて昭和 51 年度予算に間に合うように省内に委員会を設けて超特急の審議が進められた。その際、メーカー間に作るグループ研究所での研究と、五社からの研究者が集まる共同研究所の各々のテーマと相互の関係を具体的に検討する小委員会が作られ、その委員長を筆者(垂井)がつとめるよう命じられた。

1.2 意見をまとめるために

しかし、実際に集まってみると、意見はまとまりそうもない。最大の問題点はノウハウである。現在ではデバイスをどう作るかよりも何を作るかに重要度があって、製作技術のノウハウはそれ程重要視されないが、当時はきわめて重

要な財産と見られていた。しかも、その技術レベルは五社一様でなく、特に先進企業は共同で研究することによって自社の製造技術のノウハウが流出することを恐れるのである。このようなことから、高価な輸入装置などを購入して、時々集まって皆で評価したらどうかと云うような案が出る。これなど果たして研究開発と云えるかどうか疑問である。もちろん、真面目に力を合わせて共同研究を考えて下さった方もあったが、とにかく最初は、研究的性格でないものに金を使う案が多く、議論はなかなかまとまらなかった。

しかし筆者は各社からの人が実際に集まるということ自体、新しい試みであり、有益な結果を出し得る貴重な絶好の機会であり、新しい方式を生み出したし、またそれぞれ特徴のある各社の人々のベクトルを重ね合わせたなら、それまで出来なかった新しいことがきっと出来るのではないかと考えた。

まとめるためには各社を説得しなければならない。そこで説得のための標語を考えた。それは「基礎的共通的」と云う言葉であった。この言葉は以前筆者が学問的とは何かを考えたときに到達した結論であったが、この言葉自体がきわめて共通的で、色々の面で使えることを感じていた。今回は各社の皆様を説得するために超 L S I の基礎をやりますから今までのノウハウはいりません、一方共通的な技術ですから出来た技術は各社に共通して役立つものと云う説得である。

このテーマの選び方が各社の協力を可能にする面をもっていたと同時に、成果にも大きい効果をもったと考えている。最も効果的であったのは超 L S I の製造装置、とくに第 1 のテーマ微細加工装置の開発を第 1 にとり上げた点である。製造装置は基礎的であり、共通的であると同時に各社のニーズをまとめ、出来た装置を皆で評価し、次へすすめるのにきわめて適したテーマであるからである。数値目標としては上記の I B M の 1 M ビットの話もあるので、1 M ビット D R A M には 1 μ m 位の微細加工が必要であろうと考え、それを超えるサブ μ m を微細加工装置の目標とした。

第 2 のテーマにはシリコン結晶を選んだ。これはトランジスタが微細化すると共にシリコン結晶の小さい欠陥が問題となるし、より多数の集積をするためにはシリコンチップの面積も大きくしなければならない。この 2 つの問題解決のためにもより大形で良質のウェーハが必要である。結晶に関するいま一つのテーマはウェーハのそりである。そりが大きいとパターンを描画、あるいは転写するとき焦点が合わないのである。

シリコン結晶についても重要であったのはノウハウを集めると云うより各社

のニーズを集めてシリコンウェーハメーカーに注文し、納入されたウェーハを皆で検討して、その結果をウェーハメーカーに知らせると云うことで、ノウハウが最初からあまり必要ではないテーマであり、しかも各社のニーズや意見をまとめる上から多数社の共同が有意義なテーマであった。

微細加工技術とシリコンウェーハが共同研の 2 大テーマであったが、その 2 つのテーマを実施して行くためにも必要なプロセス技術、試験技術、デバイス技術などについてもその中で基礎的共通的技術のみを選ぶこととした。

1.3 超エルエスアイ技術研究組合

この組合の正式名称は表記のようなものであるが、本書の大部分では判り易さのため便宜上エルエスアイは L S I と置き換えさせていた。超エルエスアイ技術研究組合には共同研究所の他に、表 1 に示されるようにグループ研と呼ばれる 2 つの研究所があった。この内コンピュータ総合研究所は富士通、日立製作所、三菱電機の 3 社によるグループ研で、日電、東芝情報システム研は日本電気、東芝によるグループ研である。各グループ研は各社に分室をもっていて、各社個別の研究所に近い面をもっていたので本書の共同研究と云う面からは詳細を省いている。残るは共同研究所であるので超 L S I 共同研究所と略称させていた。これらの研究所を統括するのが専務理事の根橋正人氏である。根橋氏は通産省審議官の出であるが、この本質を見抜く能力をもち、かざりけがなく、ものの本質をずばりと云う方である。出向が決って最初の顔合せで、ライバル関係の会社を集めると云う今までにない研究所であるので、注意して進めるようにと云う話をいただいた。根橋専務理事のお陰で予算はいつも要求通りいただけた。また、所員の融和に大きい貢献があった。

表 1 超エル・エス・アイ技術研究組合



2. 超 L S I 共同研究所の発足

2.1 人材を集める

昭和 51 年 (1976 年) は超 L S I 共同研究所が発足した年である。前年の通

産省での委員会で大筋のテーマが決まっているので次の問題は人材の確保である。まず筆者については前年の小委員会で委員長を務めた経緯もあり、余人もいないと云うことで所長となることを承諾した。そこでほかのメンバーを集める立場となったが、いかなる組織も集まる人によって成功、不成功は決まるので各社にいろいろとお願いした。派遣する人について、早くから検討して一番地位の高い人を派遣して下さったのは東芝であった。当時、総合研究所半導体集積回路研究所長であった武石喜幸氏を共同研の室長として出向させて下さったのである。この決定の前に、筆者は東芝総合研究所の蛸崎所長から、研究所への招待を受けた。それまでの研究成果の見学と超 L S I 関係者との顔合わせの後、蛸崎所長は私に超 L S I 研への出向の意志を確認された。そこで私がそのつもりであること答え、これで武石氏らの派遣を決断して下さったようである。

武石氏は共同研に2年間出向の間に電子ビーム描画装置および紫外線露光ステッパの開発に抜群の成果を上げ、東芝に戻って超 L S I 研究所を設立し、東芝の超 L S I 研究棟を建設し、1 M D R A M の開発に協力して、他社に先んじて東芝の1 M D R A M 時代をもたらした。

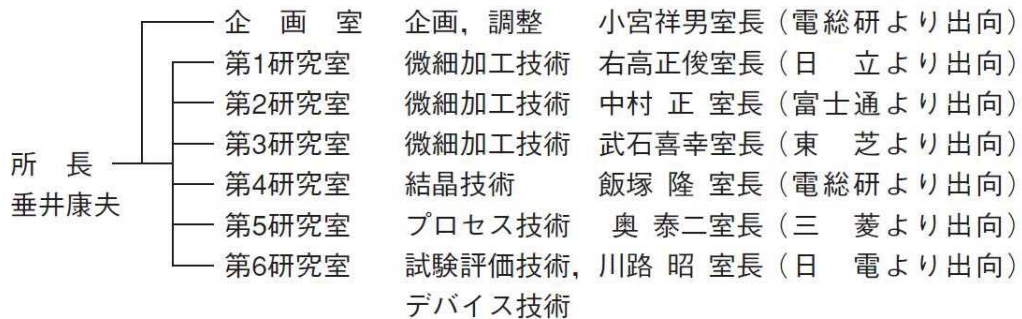
その他の会社についても室長候補についてはあらかじめお目にかかる機会を作った。一種の面接のようなものである。これについては通産省電気電子機器課の岡部武尚課長補佐がいろいろ手配して下さって機械振興会館の最上階の和室での顔合わせを行った。5つの会社から一名ずつ室長をお願いしたが、この機会を作ったせいもあってか良い室長候補にお集まりいただけた。室員の人選は各社からの室長が自分の会社から良い人を連れてくるように努力をしてくれた。良い人材は良い仕事をし、会社へ復帰するとき、良い人材を出してくれた会社には良いフィードバックがあったと考えている。

2.2 研究室の編成

次の大問題は、五社からの室長をどのテーマに割り当てて研究室を編成するかである。当時、サブミクロンは電子ビーム描画でないと出来ないと云うのが大方の意見であったので電子ビーム描画が花形であり、どの室長もこのテーマを希望した。しかしそれでは研究所が編成出来ないのもので、微細加工技術の研究室の室長についてはそれまでに会社で電子ビーム装置製作に実績のあった三社からの方に絞ることとした。結晶技術の室長は比較的学問的な基礎分野であるので電総研からの出向者とし、プロセス技術の研究室と、試験評価のデバイス

技術の研究室の室長は会社からの出向の方をお願いすることにした。このようにして出来た組織が表 2 に示されるものである。

表 2 共同研究所の組織（発足当時）



話は戻るが、超 L S I 技術研究組合の 4 年間の総予算は総額 720 億円内補助金 300 億円であるが、これは表 1 に示した 3 つの研究所の総額であって、共同研究所はそのごく一部にすぎない。一方、研究成果の発表はその多くが共同研究所からのものである。大きい予算だったから研究成果も出たと云う評は当たらないと思っている。

2.3 研究員の配置

研究テーマおよび共同研とグループ研との担当については、すでに前年の委員会にて図 1⁽¹⁾ に示すように決まっていた。すなわち、微細加工と結晶は全部共同研。設計技術は全部グループ研。プロセス、試験評価、デバイスの各技術は基礎的共通的部分のみ共同研、残りの部分はグループ研である。



図1 研究テーマの担当

共同研究所としては、次に各研究室に各社からの研究員を如何に配置するかである。とくに各社からの出向者をどの程度まぜるかと言う点である。すなわち、共同研究の実をあげることと研究のやり易さのバランスである。共同研究所が最初の試みであり、日頃ライバル関係にある会社からの出向者は最初は相当なこだわりのようなものもあった。

結局、図2⁽¹⁾の右図に示すように、研究が討論と研究所内の実験で進められるようなテーマ、例えば結晶の研究などでは各社から同じ程度の人数を集めることによって衆知を集め、各社の研究の良い面を集めて総合力を発揮することが出来た。

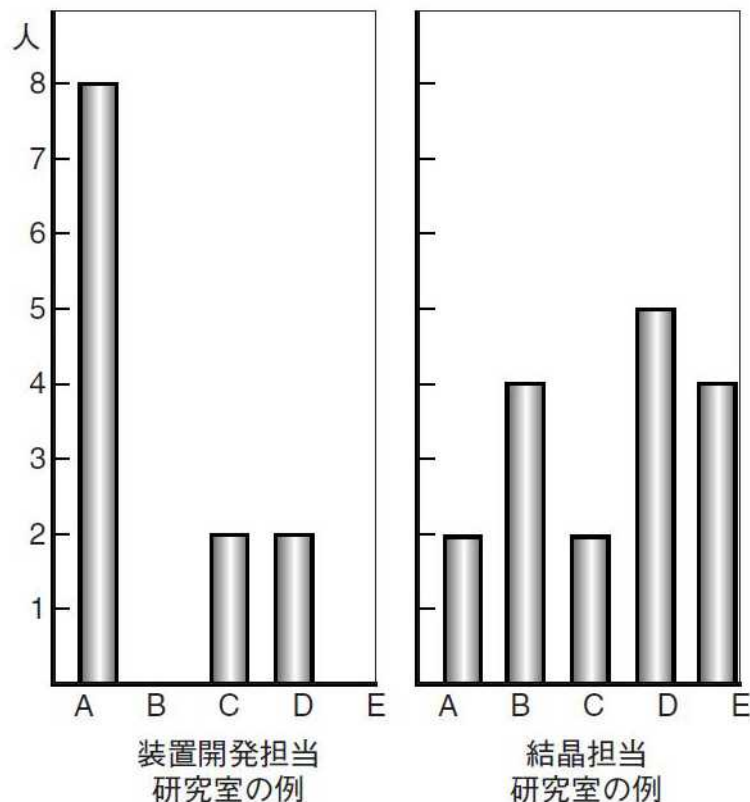


図2 各社からの出向者の研究室配置例

一方、微細加工装置の試作などを行った第1、第2、第3研究室などでは出向元の会社（それぞれ日立、富士通、東芝に対応）での製造技術を十分に活かすためには各社からの少人数ずつの集まりでは難しいと考え、図2の左図のように製造する会社Aからの出向者を中心にして、C、Dの2社から少人数を配置した。C、D社は最初電子ビーム担当の室長を希望して入れられなかった会社であったが、この編成によってC、Dの2社は微細加工担当の3研究室に室員を出向させることが出来て、電子ビームを含むすべての微細加工に関する情報を直接すべてを入手出来るようにした。

このようにして第1、第2、第3研究室は、他の研究室の意見と知恵を入れながら出向元の会社への試作依頼を行い、出向元の全面的な協力を得ることが出来た。

2.4 研究分野概観

超 L S I 共同研究所で研究開発した技術の全体像を図3⁽²⁾に示す。この図は超 L S I の製作工程にほぼそいながら、関連する技術を書き込んだもので具体

的な製作工程とは別のものである。

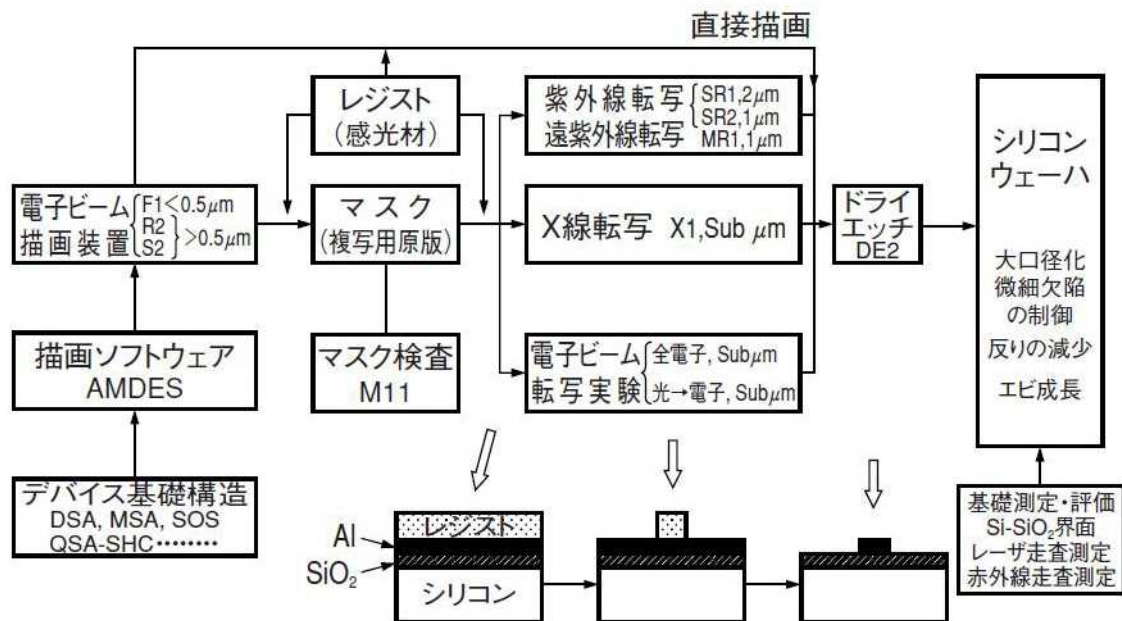


図3 超 LSI・共同研で開発した基礎的共通技術の概要

主要なるものを順次説明すると、まず左の一番上のテーマ、電子ビーム描画装置は1つの重点で、電界放射銃(Field Emission Gun)形ラスタスキャン(Raster Scan)形、可変整形ビーム(Variable Shaped Beam)形の3種類が試作された。これらの描画装置は上の線を通して直接ウェーハ上にパターンを描画することも出来るが、右横への線をたどってマスクと称する複写用原版にパターンを描画することも出来る。

マスクを使ってシリコンウェーハにパターンを転写するためにマスクの右側に示される6種の転写装置が試作された。すなわち、紫外線転写に関して等倍形のSR1、縮小形のSR2、遠紫外線を使いミラー反射レンズを用いたMR1、X線を用いた転写X1、さらに電子ビームを用いた全電子形と光パターンを電子パターンに変えるホトカソードを用いた装置の6種類であった。このように当時可能性のあった多くの種類の装置を試作検討出来たのも5社が集まって総合的に試作を進めたから出来たことと考えている。

これらのパターンの描画、パターンの転写にはレジストと呼ばれる感光材が
用いられる。これに関しての微細化と感度向上が研究された。シリコンウェ
ハ上に形成されたレジストパターンはドライエッチングによってシリコンある
いは酸化膜などに移される。ドライエッチングに関しては初のマルチチェンバ

ーによる再現性のよい装置を完成した。

シリコンウェーハについては当時次世代大口径ということで重要であった 125mm 径結晶における微細欠陥の原因の解明と制御、ソリの解明と減少などが主なるテーマと成果であった。

以上が超 L S I 製作工程の主なる流れであるが、これらの流れに必要となる基礎測定・評価技術、例えば Si-SiO₂ 界面の問題、レーザー走査測定、赤外線操作測定など必要に応じて製作工程の諸問題に第 5、第 6 研究室が協力した。一方、電子ビーム描画においてビームが近接した時に生じるパターンの変形などを避けるための描画ソフトウェアの開発、更には描画パターンに含むべきデバイスの基礎構造及び超 L S I におけるデバイスの構成方法などの研究が第 6 研究室で行われて研究所全体としてバランス度を高めて総合的に超 L S I 製造装置の開発を実現すべく組み合わされた。図 3 に示されたテーマは各部門の独立のテーマであるが、これ以外にもプロセス、試験評価、デバイス技術のグループは適時に微細加工、結晶グループと共同研究テーマをもって実行していった。

3. それまでの蓄積

3.1 超高性能電算機プロジェクトが先行

超 L S I プロジェクトはよく知られているが、その丁度 10 年前にそのさきがけとなるプロジェクトが存在したことはあまり知られていない。それは昭和 41 年 (1966 年) から始まった工業技術院の大形プロジェクトの 1 つである「超高性能電算機の研究」、略称(超)で、このプロジェクトにおいて超 L S I プロジェクトの成功を可能にしたいいくつかの準備がなされたと感じるので、ここに挿入させていただく。

筆者はこのプロジェクトで L S I 開発の部分を担当した。電総研における研究は、電子ビーム描画装置の開発と新しいデバイスの発明と開発であった。プロジェクトの始まりに当たって、装置開発のテーマを研究室の傳田精一氏と相談を重ねた。超高性能電算機は超高速を目指すのだから、超高速のトランジスタを作ることが必要であろう、そのためには光リソグラフィを超えて微細パターンを作る必要がある。それを可能にするのが電子ビーム描画であろうと云うことで丁度この年研究室に配属された馬場玄式氏を加えて世界初のベクタースキャン方式とコンピュータ制御方式の電子ビーム描画装置を試作した。発注先は当時 S E M を完成し、次の段階を模索していた日本電子(株)にお願いした。これが超 L S I プロジェクトで大規模に取り上げられ、光学ステッパ開発のきっ

かけともなった電子ビーム描画装置の始まりであった。

この電子ビーム描画装置は昭和 42 年（1967 年）に一応完成し、学会発表された。この描画装置に関連して特に有効であったのはウェーハ上での位置合せに関する特許であった。すなわち光リソグラフィでは次のマスクパターンをウェーハ上のパターンと重ねることが光学的に可能であるが電子ビームで同じことは出来ない。ウェーハ上に電子ビームで読みとるマークをつけて、これを電子ビームで走査して、反射電子、二次電子などの出力を読みとって位置ぎめを行った。このマークはどのような材料、形状がよいかなども検討して特許化した。その後波及効果が大きかったのは次の点であった。

電子ビームで描画する面積は偏向歪を押さえるために小さい面積に制限する。この装置では 2 ミリ角として、それを描画し終わるとウェーハをステップモータで移動してから、2 ミリ角ごとにつけられた 30 マイクロメートル角を走査してマークを探し、位置を決めることになっていた。所がウェーハを 2 ミリ移動すると 30 ミクロン以上の誤差が生じて、マークが検出できなくなることがしばしば起こった。そこでウェーハを保持するウェーハステージを図 4⁽¹⁾ に示すようにレーザを使ってステージを測定しようという発想が生まれ、実用新案として権利化された。その後生産された電子ビーム装置はほとんどこの方式が使われ、マークによる位置合せも含めて特許料が国庫に納入されている。

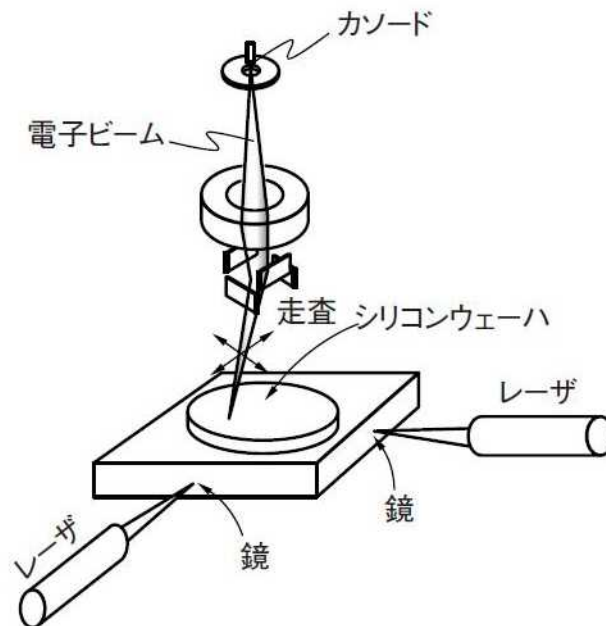


図4 電気試験所で考案されたレーザー位置合わせによるステップ・アンド・リピート機構をもつ電子ビーム描画装置の原理図

3.2 ステッパ開発の萌芽

この移動して、レーザーで測定、描画して、これを繰り返す。すなわち、ステップ・アンド・リピートの機構部分は日本光学に発注した。この時打合せのために電総研に来て下さったのが吉田庄一郎課長（のちニコン社長）であった。しかし、現在では普及したステップ・アンド・リピート装置も、最初は作るのが大変であったようである。

ところで、この装置は意外な方向への発展をはじめた。それは光学ステッパ、現在のいわゆるステッパへの発展である。それは図4に示した電子ビームのビーム源と走査部分を光学系に置き換えるという日本光学での構想から生まれた。吉田庄一郎氏によると⁽³⁾ このステッパの構想は昭和45～46年の頃に米国GCAの方々の前でプレゼンテーションした。その時、デビットマン社社長のウィーラーさんに「そんな一回一回アラインメントしてやるのでは、スループットが得られなくてだめだ」と断られたと云うことである。

そのようなことで、ステッパは最初GCAが開発して、超LSI研がこれをフォローしたと思っている人があるかもしれないが、そうではなくて電子ビーム装置で遭遇した意外な問題点に対する適切なる対処からステッパの道が拓けたと云うことである。

4. 電子ビーム描画装置

4.1 電機－機械ハイブリッド形電子ビーム描画装置 (VL-R1, BL-R2)

超 L S I 共同研究所では図 3 に示したように 3 種類の電子ビーム描画装置を開発したが、その内最初に超 L S I パターンの描画に成功して新聞発表したのは図 3 の VL-R2 の 1 号機 VL-R1 である。この形の装置は電子ビームを一方向に一定の振幅で走査しつつ、パターンに応じて電子ビームを断続させ、一方、試料台は走査と直角な方向に連続的に機械的に移動しながらパターンを描画するいわゆるラスタスキャン方式である。本装置は電子銃に単結晶の LaB_6 を用いているため、従来のタングステン電極に比べて 10 倍以上の電子ビーム電流が得られるので、従来のレジスト PMMA を用いても、高速でかつ解像力に優れた微細パターンが得られる。

試料台には勿論レーザ干渉計がつけられ、試料台の位置データは、位置回路を介して同期回路に送られ、周期回路から描画回路および偏向回路へ送り出される同期パルスで各走査の描画が開始する。

電子描画に成功

電算機開発競争有利に？

超エル・エス・アイ共同研

[illegible]

A detailed black and white line drawing of a large, multi-story building complex, likely a government or institutional structure. The drawing shows a central entrance area with a prominent staircase and a large, dark, possibly paved or landscaped area in front. The building has multiple wings and numerous windows, suggesting a large interior space. The drawing is oriented horizontally, with the main entrance facing right. The style is architectural and detailed, with many lines indicating structural elements and windows.

1平方ミリの基板に描かれた回路（最も細い線の幅は1ミクロン）

[illegible]

を便つて、早く、正確に回路を描くソフトウエア技術が確立された点で、重要な進歩、と専門家はみている。

[illegible]

本装置によれば最小線幅 1 ミクロンまでのパターンを描画出来るが、2 ミクロン以上のパターンから成るマスクを描画する場合、たとえば 100 ミリ径シリコンウェーハ用マスクパターンを 125 ミリ角基板上に約 50 分で描画可能である。

VL-R1 に引き続き微細化、高速化を計って VL-R2 を開発した。その特徴とする所は（１）サブミクロン描画を可能にした。（２）R1 に比べて 10 倍の高速描画を可能とした。（３）500 万個／cm² の処理能力を可能にした。 などである。このような高性能を達成するために、空気軸受方式の高速・高精度試料移動台

を連続移動させながら、微細パターンの形状と位置に応じて電子ビームの形状、寸法を電氣的に変化させてラスタ走査を行う方式をとり、静電的に高速走査すること、およびパターン図形の存在しない部分はとばすことによって高速化を計っている。すなわち、ラスタ走査方式に可変ビーム方式の機能を合せもたせた高速描画新方式である。

VL-R2 では、電子ビーム系にこの高速描画に向く可変ビーム方式を採用し、最小線幅 0.5 ミクロンで、1/8 ミクロンきざみの描画が出来、重ね合わせ精度も 0.2 ミクロン以下と良好であるため、サブミクロンから数ミクロンに及ぶ微細パターンの描画が可能である。さらにネガ／ポジ反転やミラー描画、スケーリング等の機能を有しているので、レチクル（マスク）描画はもとより、シリコンウェーハ上への直接描画も可能である。

VL-R1、R2 は主として東京芝浦電気(株)において製作が行われ、第3研究室(武石喜幸室長)において完成された。この技術はその後東芝機械(のちにニューフレアと改名)に技術移転し、発売されている。この装置はマスク描画装置として広く使われており、その改良型の '06 年における世界シェアは 45%と推定されている⁽⁴⁾。

4.2 可変成形ビームベクタスキャン形描画装置 (VL-S1, VLS2)

可変寸法成形ビーム(略して可変成形ビーム)を用いた電子ビーム描画方式のアイデアは国内で考案され、(財)理化学研究所と富士通(株)によって特許出願されていた。この方法は細い電子ビームをXおよびY方向に走査するラスタスキャンと違って必要とする寸法の四角い電子ビームを必要とする場所に配置するベクタスキャンによって描画して行くもので、共同研において世界で初めて実現された。

この可変成形ビームの原理はまず VL-S1 において試みられた。その原理図は図6⁽¹⁾に示される。すなわち、通常のエレクトロニクスレンズの他に更に2枚の角形の窓を設けてある。電子ビームはまず第一の窓で周辺の不要部を切り落として短形に整形される。次にその像を偏向電極により第2の窓に偏心して投影することにより、不要の部分を切り落とし、任意の寸法の短形ビームが得られる。この整形ビームを結像レンズを通して縮小してから走査偏向電極によってウェーハ面に縮小投影することによりパターンの露光を行う。

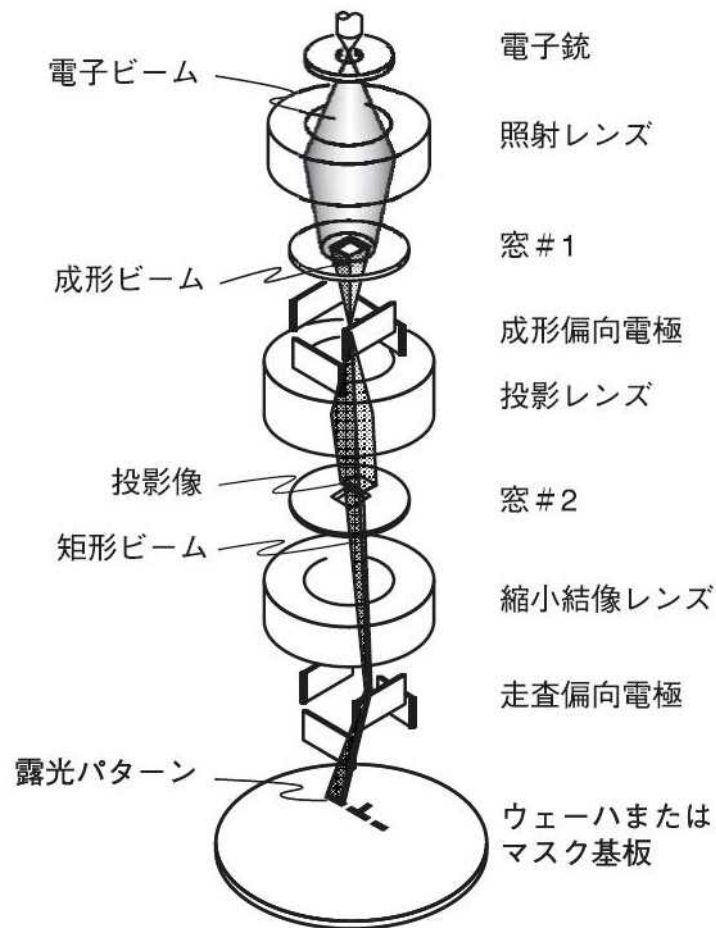


図6 可変寸法矩形ビーム描画装置の原理

実際のパターンは概ね基本的に種々の寸法の矩形より成り、例えば代表的なメモリの基本回路は12ヶの矩形により構成されている。これを従来の露光方式によって描画する場合、約4400スポットの露光が必要となるが、本可変寸法矩形ビーム方式によれば、わずか12回の露光で住むこととなり、画期的な高速描写が可能となる。写真1はVL-S1により露光パターン例で、継ぎ目が目立つことなくパターンが形成されていることがわかる。

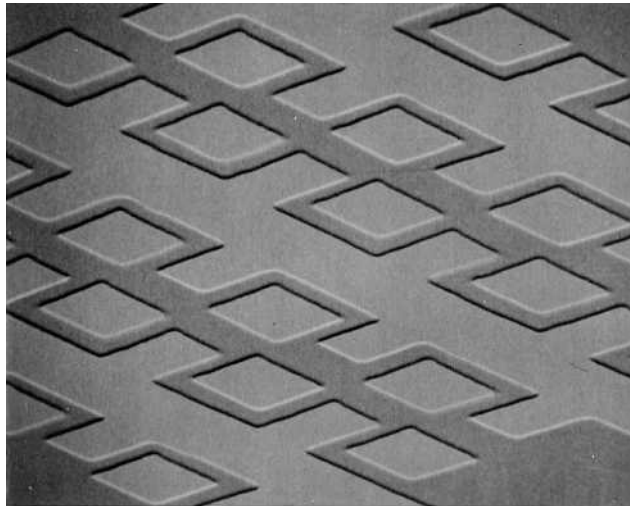


写真1 VL-S1 による露光パターン例

これらの VL-S1 の試作と実験を元にして本番の VL-S2 が製作された。写真2 は VL-S2 ⁽²⁾ の全体像である。VL-S2 は 100mm 径ウェーハ全面に超 L S I チップ描画可能なデータ処理能力をもっている。超 L S I チップは 500 万パターン／チップ、2.5 億パターン／100mm 径を想定している。可変成形ビーム寸法は 2.5～5 μm 、描画速度は、超 L S I チップ 100mm 径全面描画で 9～15 分の

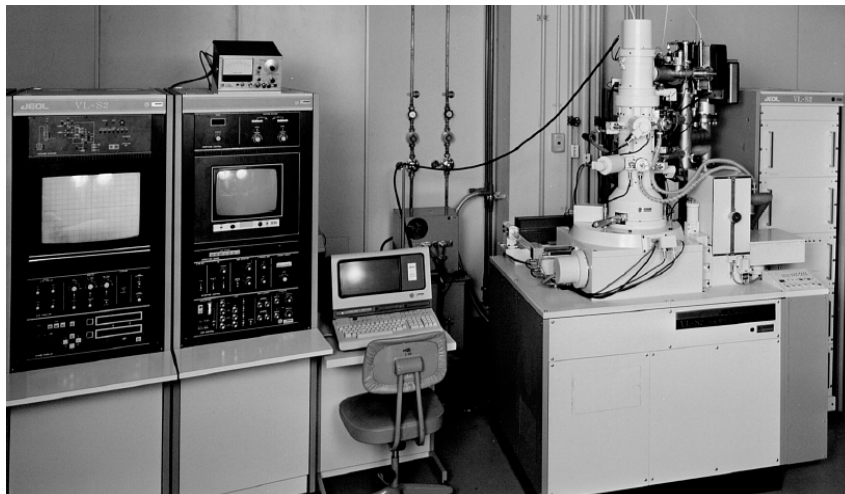


写真2 可変寸法整形方式高速電子ビーム描画装置

高速である。写真3 ⁽²⁾ は描画パターンの一部拡大写真である。そのシステム構成の概要を図7 ⁽²⁾ に示す。この構成において、描画データの主要な流れは以下のようなになる。描画チップデータは、磁気テープによって受け付けられ、磁気

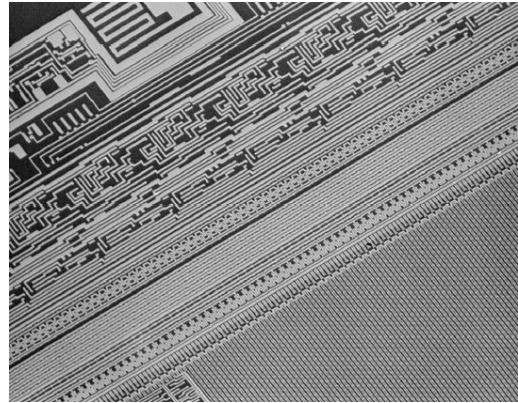
デスクに蓄えられる。磁気デスク内の描画データは、1チップデータごとに高速データ転送制御器を経由して、高速、大容量バッファメモリ内に一時蓄えられる。



チップパターン

チップサイズ 約9.6mm角

矩形パターン数 約 500 万パターン



チップパターンの拡大 SEM 像

最小パターンサイズ 1 μ m

写真3 超LSIチップパターンの例

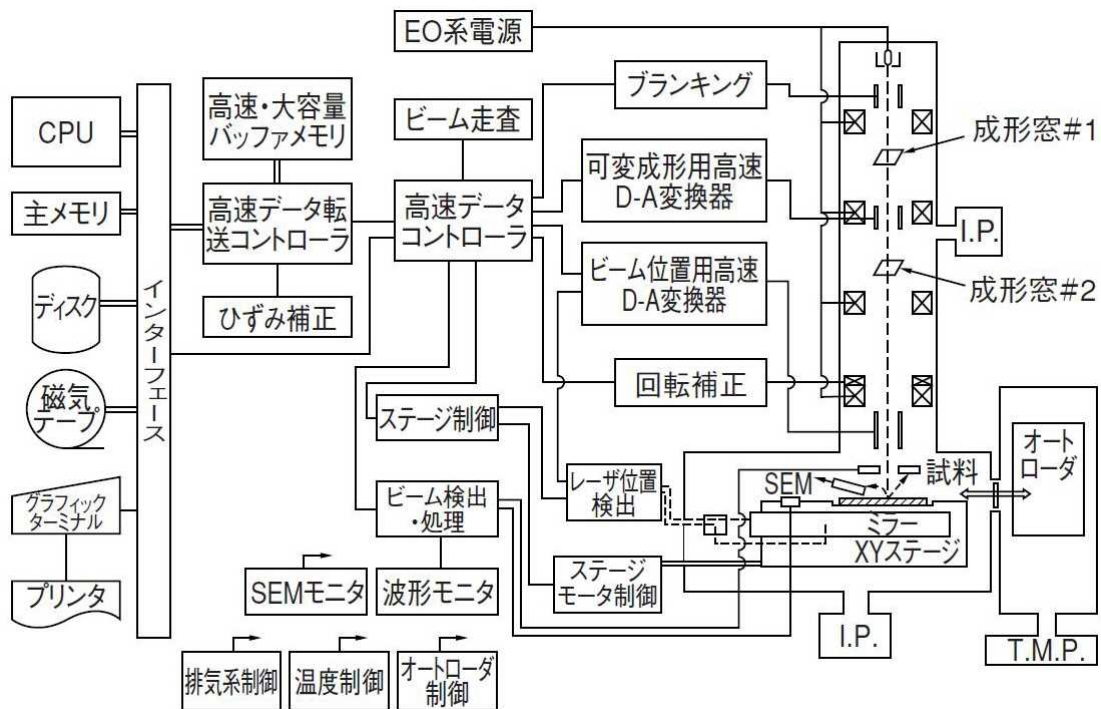


図7 可変成形ピームベクタスキャン系描画装置 (VLS-S二) の構成

この際、一つの方形データは、記憶装置内で一語の対応で蓄えられる。描画開始信号とともに本バッファメモリから高速転送サイクルで語転送がなされる。あらかじめ測定されたフィールド偏向ひずみデータをもとに、各方形描画データはひずみ補正を受け、高速データ制御器のブロックに転送され、ここで各 D-A 変換器に対応したレジスタにそれぞれのデータが入力される。各 D-A 変換器を介して偏向電圧が入力された後、ブランキング信号が削除されて、電子ビームが鏡筒中を通過して、X Y 移動台上の試料面に露光が行われる。

本装置は共同研究所が目標性能、仕様を定め、基本設計を行って、装置の詳細設計と試作は日本電子(株)が主担当となって実施し、高速バッファメモリは富士通(株)の指導のもとに富士通電気化学(株)が担当し、共同研第2研究室(中村正室長)において完成された。この装置はその後日本電子(株)から発売されている。この装置の改良型の'05年の世界シェアは40.6%であった⁽⁴⁾。一方富士通での技術はその後アドバンテストに移され、これも商品化されている。

4.3 電界放射銃を用いた電子ビーム描画装置 (VL-F1)

超LSIは寸法がどこまでも小さくなることが予想されたので、電子ビーム描画装置についても照射ビーム径が小さくなる方式を製作した。それは電子源

として電界放射電子銃を用いたものである。電界放射電子銃は、高真空中で先端が 0.1 ミクロン位の尖鋭なタングステン先端に 1cm 当り 10 メガボルト以上の電界を加えると、強い電界により金属表面の電位障壁が薄くなり、金属中の電子がトンネル効果によって真空中に放出、高い輝度の数 10 オングストロングくらいの点電子源が得られることを利用するものである。日立製作所においては電子放射電子銃はすでに走査型電子顕微鏡 (SEM) に使用実績があったので、当初はその電流を露光に必要なだけ増やせばよいと考えていた傾向があった。

ところがレジスト露光に必要な電流は 100 倍くらいで、このくらいの大電流を流すと、残留ガスが電子によってイオン化されて、そのイオンがタングステンをたたいてタングステン針を変形させることが判って来た。すなわち、電界放射電子銃の付近の真空度を多少のガスが出る状態においても 10^{-10} 以上に保たねばならないことが判って来た。このような経過もあって、この電子放射銃型については電子銃の改造に手間取り、VL-F1 なる機種を完成して 1979 年 5 月に発表した。

このようにして出来上がった電子ビーム源と電子光学系の概念図を図 8 に、外観を写真 4⁽¹⁾ に示す。上にも述べたように真空度を電子銃付近では高く、試料台付近では感光剤を使ったり、試料の移動を行ったりするために真空度はそれ程上げることは出来ない。このため図 8、電子銃、第 1 中間室、第 2 中間室をイオンポンプで、加工室をターボ分子ポンプで排気し、有機ガスの混入を防止するとともに、各真空室間の電子ビーム通過孔を必要最小限に小さくして差動排気を行った。その結果、加工室の真空度が 2×10^{-6} Torr のとき、第 2 中間室の真空度を 1×10^{-8} Torr よりも高真空に、第 1 中間室の真空度を 1×10^{-9} よりも高真空度に、そして電子銃室を 3×10^{-10} Torr より高真空にすることが出来た。各部分からの真空排気の様子は写真 4 によって見る事が出来る。

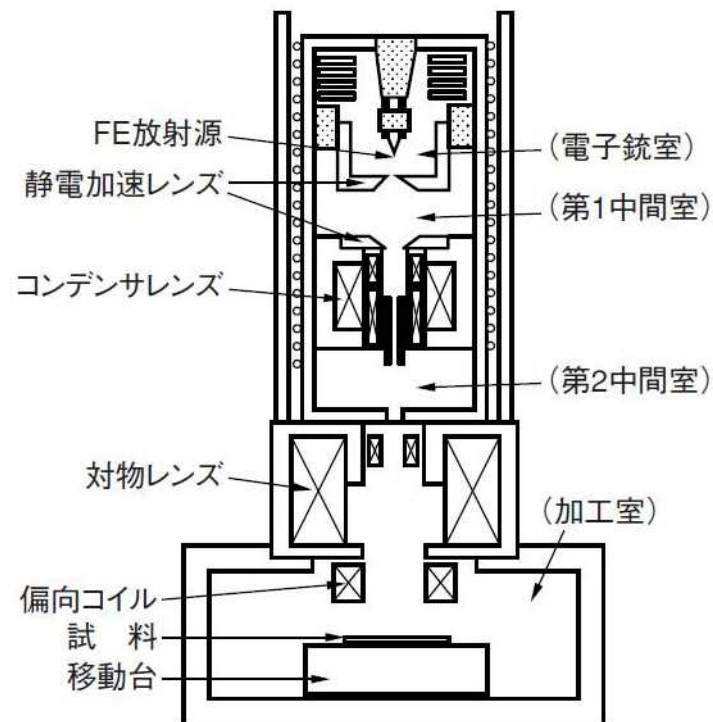


図8 電界放射電子銃および電子光学系断面構造

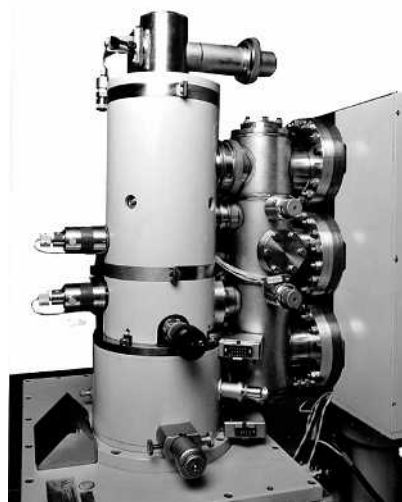


写真4 VLF1の外観

さらに大電流放出の動作状態で高真空を得るためにはチップ近傍物体表面の吸着ガスを十分に除去する必要がある。このため電子銃外部にヒーターを巻き、高真空状態で加熱して十分ガス出しが行えるようにした。このようにしてこの電子銃では常温動作で全電流 $100\ \mu\text{A}$ を長時間安定に取り出すことが出来た。

図9⁽²⁾は開発された電界放射電子銃が従来の熱電子放射電子銃にくらべて小

さい電子ビーム領域でより大きい電子ビーム電流を取り出し得るかを示したものである。すなわち、ビーム直径 $0.1\mu\text{m}$ のとき熱電子放射銃を用いた場合の 10 倍以上の電流がとれる。また両電子銃の電流が等しくなるビーム径は $0.5\sim 0.6\mu\text{m}$ と従来の 5 倍程度に大きくなっている。

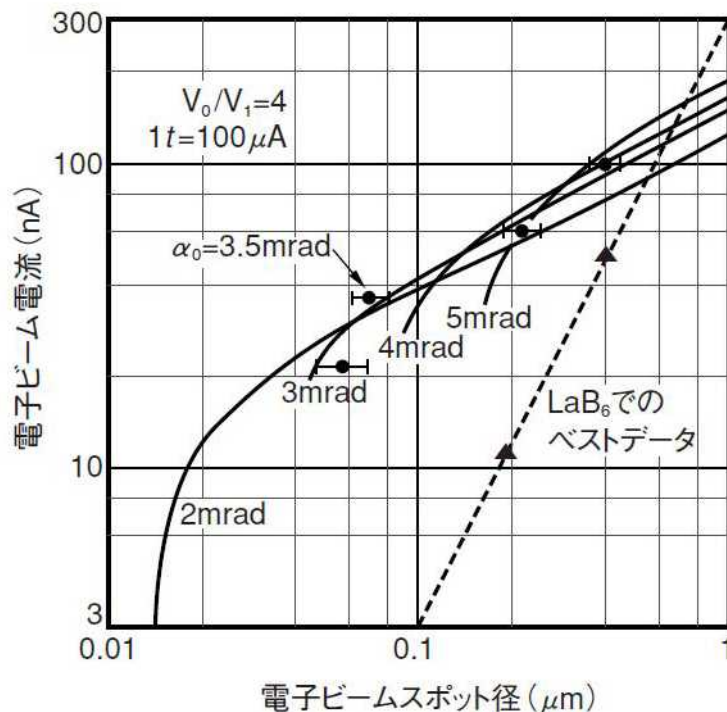


図9 電界放射電子銃の電子ビームスポット径とビーム電流の関係

本電界放射電子銃を用いた描画装置は第 1 研究室（右高正俊室長）において完成され、その後日立製作所において製作・発売された。

4.4 電子ビーム描画用ソフトウェア

電子ビーム描画装置（ハードウェア）を最大限利用し、精度よくパターンを描くためには、利用技術（ソフトウェア）の開発もきわめて重要である。電子ビーム描画のためのソフトウェアの役割は、マスクパターンの設計データを電子ビームの偏向歪、近接効果、ウェーハソリ、多重露光などによって起こるパターン歪を補正してマスク上にあるいはウェーハ上にマスクパターン通りのパターンを実現するために変換するものである。

これらはすべて複雑な数学的操作によって行われるもので、それらをここで

すべて解説することは避け、共同研で特に開発し、成果が写真でよく観察出来る近接効果に関する例を示す。

近接効果とは電子ビームで描画するパターンが近接していると、2次電子の放出、レジスト内の電子の散乱などによるパターンの滲みによって図形が分離できないなどの現象が起ることである。詳細は省くことにするが、近接効果補正を用いた一例を写真5⁽²⁾(a)(b)に示す。(a)は補正前でパターンが分離されずに連続した部分が見られるが(b)は補正後で、よく分離できていることが判る。近接効果補正はその後ステッパーを用いた光露光についても多く使われている。

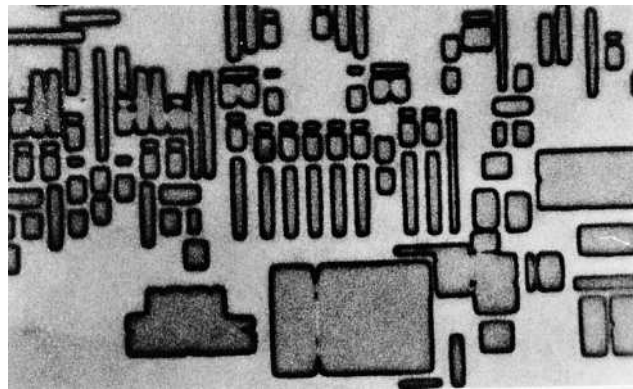
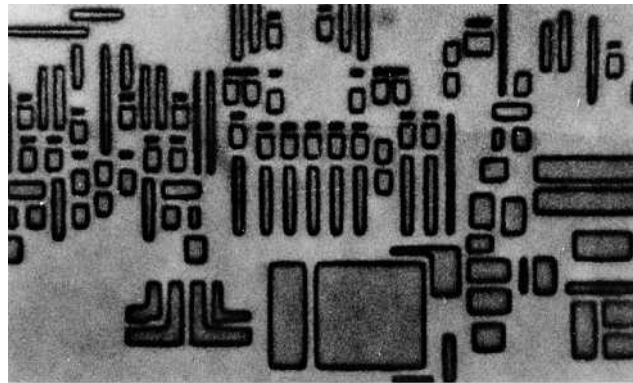


写真5 (a) 近接効果補正前



(b) 補正後

本描画用ソフトウェアの開発は第6研究室（前期 川路昭室長、後期 清水京三室長）において主として杉山尚志・斉藤和則両研究員によって行われた。

5. 転写装置

5.1 各種の転写装置の概説

前章の電子ビーム描画は電子ビームによってパターン自身を描いて行くもの

であるが、同じパターンを多数作る場合の量産性は良くない。量産においては印刷技術におけると同様に原版を作ってこれを転写することが有利となる。このような点から量産に重要と云うことで共同研においては図3の中央部分に示される6種類の転写装置を試作した。

原始的なICにおけるパターン形成は原版のネガマスクと、フォトレジストを付けたシリコンウェーハを密着させた状態で光を露光する方法を用いた。この方法の最大の欠点は光を使うことではなく、マスクとシリコン上に既に付いてあるパターンの位置合せをするときにマスクとシリコン上のフォトレジストを傷つけて欠陥を作り、歩留まりを悪くする点にあった。したがって光を使うことが悪いのではなく、密着焼が悪いのであるから光についても投影転写の形をとることにした。図3の上から順に簡単に説明すると紫外線転写は3.2においてその開発の萌芽についてのべたように前からの経過の発展であるがいわゆるステッパーである。

SR1はキャノンで試作された等倍マスクを用いた1対1での投影転写装置でイメージフィールドは30mm×30mmで大きいが実用解像力は2 μ mのステッパーであった。SR2は(株)ニコンで試作された10:1の縮小投影転写装置すなわちステッパーであり、イメージフィールドは10mmであるが実用解像度は1 μ mであった。遠紫外線転写MR1は反射ミラーによる反射投影を使うことによって遠紫外線までの光の使用を可能としたもので、1.5mm幅のスリットスキャン方式を用いた。MR1はキャノン社において試作され、その後販売され超LSIにも使われたが最近液晶パネルの露光装置として寸法を大形化して販売使用されている。これも基礎的共通的なポテンシャルを示したものと云えよう。

X線転写X1はAlをターゲットとするX線とシリコン枠をもつポリイミドマスクを用いる1対1の等倍転写装置であるが、1対1である点、位置合せの問題などで実用に至っていない。

電子ビーム転写実験は2つの方法について行った。1つは全電子による方法で丁度、光学ステッパに模擬するとマスクに金属マスクを用い1/4の縮小率で3mm角のフィールドサイズに0.2 μ mの解像度で転写するものである。

一方光→電子と示した方法はホトカソード方式とも呼ばれ、クロームマスクのクロームのない部分にCsIなどを配置し、紫外線がマスクに照射されるとCsIのある部分から電子が放出される。CsIを含むマスク面に直角の方向に集束磁界をかけると、CsIから放出された電子はマスクから所定の距離はなれた平行面に集束し、パターンを形成する。

これら6種類もの転写装置が試みられたことは、まさしく5社の共同研究のおかげだと思っており、その中から次に述べるステッパーが生まれたのも全体を試みられたおかげだと思っている。

5.2 紫外線縮小転写装置

いわゆるステッパーであるが、前節で述べた等倍を試作したキャノンもその後縮小に切り替え、最初から縮小であった日本光学（現ニコン）とキャノンによって一時は世界のシェアの大半を押さえて80年代以降の超LSI開発に大きな貢献をした装置である。

まず日本光学で試作した装置 VL-SR2 の外観写真を写真6⁽²⁾に、これに対応

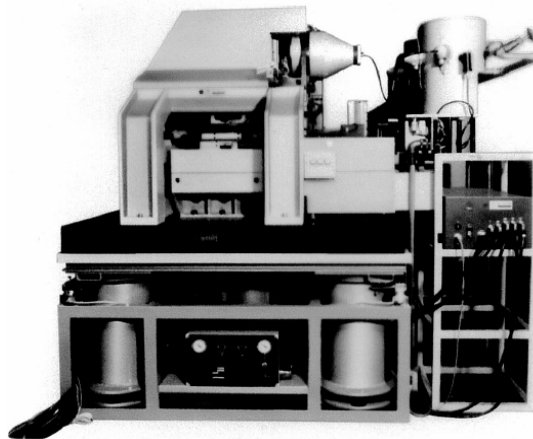


写真6 VL-SR2 の外観

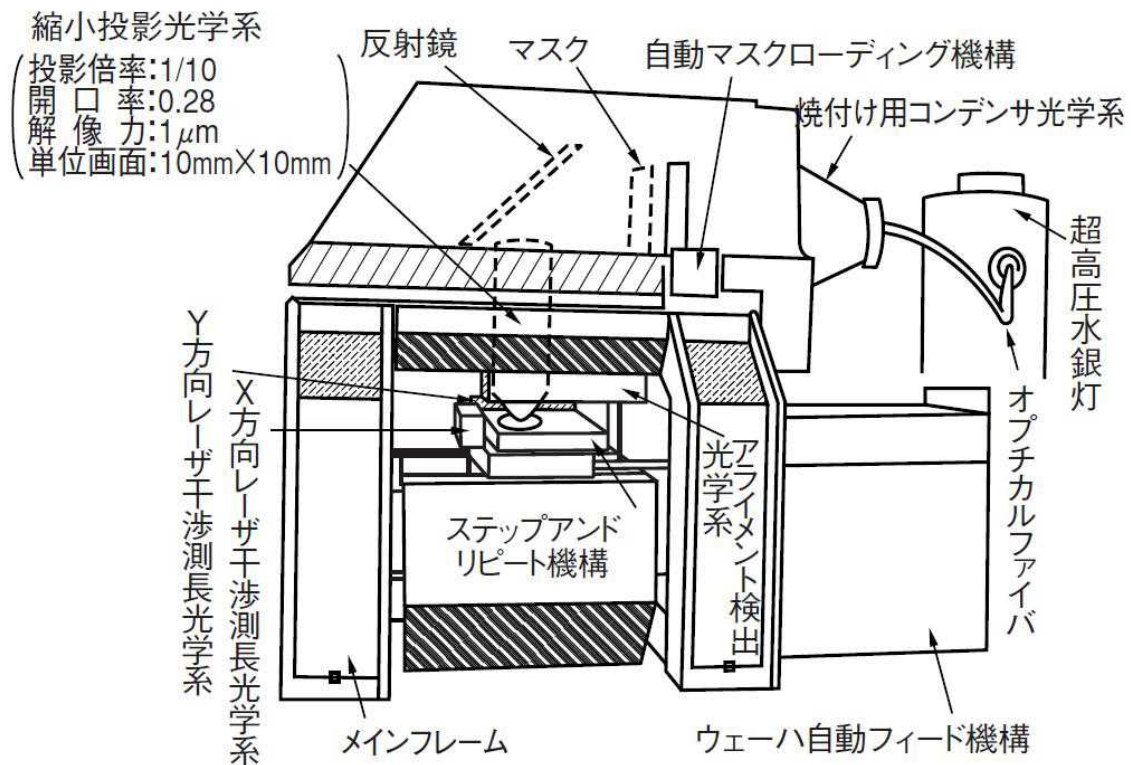


図 10 VL-SR2 の機械概要

する機構概要を図 10⁽²⁾ に示す。日本光学はこの設計においてきわめて慎重であった。たとえば投影光学系は光軸を垂直に配置して結像性能の安定化を図っているが、マスクの配置も垂直に配置することによってほこりの付着による欠陥の発生を予防している。光源は超高圧水銀灯からの g 線を利用するが、写真、図から判るように超高圧水銀灯は右端に分離して配置され、光を集光レンズで集めて、熱線を遮断し、単波長化した後、光ファイバでコンデンサ光学系に導いている。光ファイバはその間で組み換えて、光源の「むら」が出ないように、コヒーレンシーもなくすようにしてある。一方上にのべた安全サイドの設計はこの試作機で検討の上、不要な点は取り除かれて製品では写真 7 に示されるようにずっとスマートになっている。なお VL-SR2 は第 3 研究室（前期 武石喜幸室長、後期 谷田和雄室長）によって開発された。

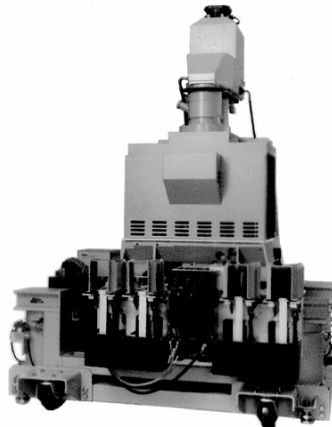


写真7 VL-SR2 が製品化された時の外観

これらの装置の改良品のシェアは一時世界の過半を押さえたが、'06 年においても台数ベースにおいてニコン 30.4% キヤノン 28.8%であった⁽⁴⁾。

5.3 縮小転写装置のその後

縮小投影転写装置の波長と光学系の変化を図 11 に示す。図の右側にある g 線



図 11 転写装置に用いる光の波長と光学系

が上記 VL-SR2 で用いたものであるが、その後 i 線、さらにはレンズ系を合成石英レンズに変えて、エキシマレーザによる KrF、ArF と続いている F2 にはまだ困難があると思われていた所に ArF を用いても対物レンズとシリコンウェーハの間の空間の屈折率をあげれば解像度は上げ得ると云うことで水を充たす液浸と云う方法が実用化されており、おそらく将来はこの液体を屈折率が高くて工程に影響を与えない方法が考えられ、さらにはソフト X 線を縮小投影する EUV、直接パターンを押さえつけるナノプリントなど、色々と考えられて行くと思われる。まだまだ解像度は上がって行くと考えられる。

6. シリコン単結晶技術

シリコン結晶は一つの学問分野であり、共同研では各社におけるこの分野の専門家を集め、第4研究室としてまとまりのよい集団を形成した。その集団における議論と結論は当時の日本においては最高のもので、しかも共同研においては予算の裏付けもあって実行力をともなうものとなった。当時大口径化としては5インチウェーハが次の世代の段階であったが、この試作品をシリコンメーカー5社に依頼し、その提出試料を下にのべるような項目に関して検査してその結果を報告すると云うことを何度か繰り返し、これによって日本のシリコンウェーハの品質は格段に向上した。この手法は米国においてIBMが同様なことをフォローしたと聞いている。

主要なる測定項目の一つは反りと変形である。これは微細リソグラフィの精度にかかわる問題である。今一つはシリコン中の微小欠陥である。これまた長い研究の歴史を有するものであるが、素子の高密度化に伴って微小領域や表面近傍の欠陥が特に問題になって来た。この2つの問題はそれぞれ詳しく測定と分析がなされた。なお、結晶についての研究は主として第4研究室（飯塚隆室長）において行われた。

7. まとめ

以上の超LSI共同研究所の経過から考えて、共同研究プロジェクトのあり方に対する要点をまとめることにする。まず多数社が集まって研究するのであるから、歴史や技術の異なる多数社からの人々が集まったことを有効に使えるテーマであることが必要である。現在のプロジェクトでも1社+中立機関といったテーマが結構見受けられるのは残念である。

次に基礎的共通的と云う考え方が重要である。ここで基礎的共通的云うのは学問的な基礎的と云うのとは違った意味である。そのプロジェクトおよび実用化において基礎的かどうかと云うことである。これは土木工学を基礎工学と呼ぶのに似ているかと思う。このプロジェクトの基盤となって必ずその上に積み上げられていくと云う基礎である。共通的は集まった会社、機関にとって共通的に有益であって平等的であることが望ましい。

このような点から超LSIにとって微細加工製造装置はきわめて条件をよく充たしていたと考える。各社が集まって色々の意見を持ちよって電子ビーム描画にせよ、転写装置にせよ複数の可能性ある装置を発注試作しその結果を経過

も含め各社に報告してまとめ、出来上がった装置は各社で評価して満足した会社で購入して超 L S I を製作した。各社が集まったから多くの意見がまとめられたし、出来上がったものを多くの会社で採用して共通的に基礎となったと思っている。したがって製造装置の開発は必要な条件を満たせばプロジェクトとして常に重要なテーマとなり得る。

一方シリコン結晶のテーマについては専門分野が比較的にせまいために専門の近い学者が集結出来た点がまず有利であったと思われる。シリコン結晶の研究においては他の分野に比較して学問的な研究も進められたが、重要な点は“そり”と微小欠陥と云う各社にとって是非必要な基礎的で共通的な具体的目標が設定されていたことが成功に導いたのではないかと思う、さらに加えるならばシリコンウェーハメーカー 5 社に発注して、そのウェーハを試験することによってより基礎的共通的な面が生み出せたのではないかと考える。

おわりに御指導いただいた超エルエスアイ技術研究組合根橋正人専務理事に厚く感謝する。(垂井康夫)

参 考 文 献

上述の内容、特に図、表および写真はその殆んどが超エルエスアイ技術研究組合から新聞発表したものである。それらの多くは下記 (1) (2) の文献にも引用させていただいているので参考文献として示すことにする。

- (1) 垂井康夫；“超 L S I への挑戦”，工業調査会 2000
- (2) 垂井康夫；“超 L S I 技術”，オーム社 1981
- (3) 日本半導体製造装置協会編，“半導体立国日本”，日刊工業新聞社 1991, p115
- (4) プレスジャーナル社調査による。