

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25750120

研究課題名(和文)半導体製造工程における統計的工程管理

研究課題名(英文)Statistical process control for semiconductor process

研究代表者

川村 大伸(Kawamura, Hironobu)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50548261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：伝統的な統計的工程管理では、少品種大量生産が想定されているため、半導体製造工程のような多品種少量生産が主である工程に対しては、新たな管理方法が求められている。本研究の主な成果としては、ベイズ統計学を用いた管理図の開発、多変量管理図の有用性の検討、過飽和計画の性能評価結果を基にしたガイドラインの作成が挙げられる。

研究成果の概要(英文)：Traditional control charts are designed for processes where large historical data sets are available before a production run for estimating process parameters and computing control limits. Many processes, particularly in semiconductor manufacturing, often involve limited data sets, which result from high-mix low-volume production. Therefore, we proposed a control chart based on bayesian statistics, an application of multivariate control charts, and a selection guide for two-level supersaturated designs.

研究分野：統計的品質管理

キーワード：統計的工程管理 実験計画法 品質管理 半導体製造

1. 研究開始当初の背景

伝統的な統計的工程管理では、少品種大量生産を想定しているため、半導体製造工程のような多品種少量生産の現場では、有効に機能しないという問題がある。例えば、従来の管理図では、管理図を設計する前に十分なデータが採取されているという前提が置かれているが、多品種少量生産を行っている現場では、品種ごとに層別すると十分なデータが蓄積されておらず、管理図管理が実施できない。

2. 研究の目的

本研究では、多品種少量生産である半導体製造工程を対象とし、昨今の製造環境に適した統計的工程管理手法の提案を目的としている。

対象とする手法は、多品種少量生産に対応できる管理図と、管理図にプロットすべき管理特性をスクリーニングするために有用と考えられる 2 水準過飽和計画である。

3. 研究の方法

半導体製造工程の現場観察、多数の技術者との議論、および実データの採取・解析を通じて現状把握を行う。その結果を基にして提案方法を考案し、その有用性を実データに対して適用することで確認する。また、数値シミュレーションを行うことで、理論的な妥当性についても検討を行う。

4. 研究成果

(1) 技術者に対するインタビューにより、多品種少量生産によって生じる問題を“多品種”と“少量”に区分して整理した。次に、先行研究をレビューした後に、これらの問題を解決できると考えられる Quesenberry の Q 管理図に着目した。この管理図は理論的な評価はなされているが、実務において有用であるかについては未知数である。そこで、半導体製造工程の一工程である LPCVD 工程から得られたデータセットを用いて、評価を行った。

具体的には、通常であれば品種毎に管理図を作成しなければならないが、Q 管理図を使用することによって、1 枚の管理図で多品種を管理可能か否かの評価、さらには少量である品種の生産時に工程異常が発生した場合であっても異常を検知できるか否かの評価を行った。

また、Q 管理図のデメリットの一つとして、変換によってスケールが変更されてしまうことが指摘されている。これは Q 管理図にプロットされる打点が生データではなく、変換後のデータとなるため、技術者が持っている知見や経験から工程異常の兆しの発見や、異常発生時における原因探索を困難にしてしまうなどの危険性を孕んでいることを意味している。これに対しては、Q 管理図設計のプロセスとは逆に、生データは変換せず、代わりに中心線や管理限界線を変換すること

によるデメリットの解消方法を提案した。

(2) 半導体製造工程(ウエーハプロセス)においては、品質特性のウエーハ内変動の大きさより変動パターンが問題となる場合がある。ウエーハ内の変動パターンには、加工装置への副生成物の付着や主要パーツの劣化、副生成物の除去とパーツ交換を行う装置メンテナンスの効果を受け、特有の繰り返しパターンが現れる。このウエーハ内変動は“ばらつきの大きさ”ではなく“ばらつきのパターン”であることから、ウエーハ内変動をばらつきパターンの情報を持たない R 管理図によってモニターすることは妥当ではなく、測定位置を変数とした多変量管理図の利用を考えることができる。

本研究では、多変量管理図の変形であり Jackson and Mudholkar(1979)によって提案された T^2 -Q 管理図に着目し、1) T^2 統計量と Q 統計量を構成する主成分の分割に対する考え方 2) 寄与プロットの応用 3) ばらつきのパターンをモニタリングする必要性について提案と考察を行った。この考え方は、従来型管理図の主流であった変動の大きさの管理から、変動パターンの管理に視点を転換する方法の一つである。

具体的には、ドライエッチ工程を対象とし、工程異常の検知・停止・再開までを理論および実データの解析にもとづいて議論し、 T^2 -Q 管理図を実践する上で問題となる T^2 管理図に含むべき主成分数の決定に関する手順、および異常診断に役立つ寄与プロットに関して新しい方法を提案した。提案した実践方法を様々な工程に適用し、多変量管理図と比較することで、提案した方法を用いた T^2 -Q 管理図の有用性を明らかにした。

最後に、“変動パターン”をモニタリングする意義について、スポット溶接や切削工程を事例として取り上げ、半導体製造工程にのみならず、他産業でも重要であることを検討した。

なお、本研究成果は日本品質管理学会の論文誌である品質誌に掲載され、品質技術賞を受賞することができた。

(3) Quesenberry の Q 管理図では、製造初期に異常が発生した場合には、その異常変動に追従してしまい、検出力が低下してしまう問題がある。そこで、Q 管理図の欠点を克服した少量生産に対応できる新たな管理図の開発を行った。具体的には、ベイズ統計学を用いた逐次更新型の \bar{X} 管理図を提案した。

従来の管理図と同様に、工程から得られるデータは正規分布に従うと仮定し、パラメータである工程平均や工程分散がそれぞれ既知あるいは未知の場合に分け、従来の \bar{X} 管理図との比較を行った。

今回は無情報事前分布を仮定したため、大きなパフォーマンスの相違はなかったが、事前情報を活用できる点や、管理図設計前に事

前データを集める必要がないことから、少量生産に対して有用な管理図を提案できたと考えている。

(4) 本研究では、工程に関する事前情報があると仮定し、それを利用できるベイズ統計学を多品種少量生産に対して有効とされているQ管理図に組み込むことで、多品種少量生産を指向したベイズQ管理図を提案した。

Q管理図と比較することで、Q管理図の問題点として指摘されている工程管理の開始時に検出力が劣る問題に対し、ベイズQ管理図は測定値数の少ない時にも検出力が高く、この問題を解決できていることが確認できた。

実務での使用可能性を高めるために、統計的工程管理の視点から利用できると考えられる、目標値や規格、工程能力指数などの事前情報を事前分布に組み込む方法も提案した。そして、異常が発生していない状況におけるエラーの確率や、異常が発生した状況における異常を検出する早さをシミュレーションにより評価することで、事前情報を事前分布に組み込む方法の有用性が示された。

異常が継続的に続く状況においてQ管理図の検出力が劣る問題点に対し、ベイズQ-Stop管理図とQ-Stop管理図を提案し、シミュレーションを用いて有用性を評価することで、その問題点を解決できることを示した。また、ベイズQ-Stop管理図とQ-Stop管理図を比較し、ベイズQ-Stop管理図の方が、優れていることがわかった。

正確で確信度が高い事前情報があり、測定値数が少ない状況を想定すると、ベイズQ管理図が有用な手法である。また、正確な事前情報があり、ある程度の測定値数が集まる状況を想定すると、ベイズQ-Stop管理図が有効である。事前情報がない状況では、Q-Stop管理図の使用が推奨される。

ベイズQ管理図の限界として、下記三点が挙げられる。

- ・母分散の事前情報の確信度が高いことが求められる
- ・母平均の事前情報がある程度正確(事前分布の期待値と真値の差が1以内)であることが求められる
- ・母分散の事前情報が正確であることが求められる

ベイズQ-Stop管理図とQ-Stop管理図の限界としては、どの時点でパラメータ更新を打ち切るかにより、管理図の検出力が左右されることが挙げられる。

ベイズQ管理図は上記で挙げた限界もあるが、新たな事前分布の設定方法や、事前情報の正確性の確保が行えれば、より有用な手法となることが期待できる。

(5) 管理図にプロットすべき重要な管理特性を特定する方法として、2水準過飽和計画を用いたスクリーニング実験に着目した。

スクリーニング実験に有用な計画として2水準過飽和計画がある。様々な2水準過飽和計画が先行研究において提案されているが、どの計画をどのような場合に使用するべきなのかが明らかにされておらず、これが実務で活用する上での障壁となっている。

そこで本研究では、D-最適性などの評価指標を用いて既存の計画を評価し、割付けたい因子数と実験回数の観点から好ましい計画を選択できるガイドラインを作成した。

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6件)

Kawamura, H., Nishina, K., Higashide, M. and Suzuki, T., International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 査読有, Vol. 9, 2013, 3667-3676

東出政信, 仁科健, 川村大伸, 品質, 査読有, 44巻, 2014, 341-350

川村大伸, 品質, 査読無, 44巻, 2014, 276-279

Tomohiro Nakajima, Hironobu Kawamura, Proceedings of the thirteenth ANQ Congress, 査読有, 2015, Vol.13, 1-12

Yasunari Tsuruoka, Hironobu Kawamura, Proceedings of the thirteenth ANQ Congress, 査読有, 2015, Vol.13, 1-14

Tomohiro Nakajima, Hironobu Kawamura, Total Quality Science, 査読有, Vol.2, No.1, 48-59

[学会発表](計4件)

川村大伸, 仁科健, 東出政信, 第5回横幹連合コンファレンス, 2013

Masanobu HIGASHIDE, Ken NISHINA, Hironobu KAWAMURA, Ryota SUGIURA, AEC/APC Symposium Asia, 2015

東出政信, 仁科健, 川村大伸, 杉浦遼太, プラナリゼーションCMPとその応用技術専門委員会第150回研究会, 2016

鶴岡靖成, 川村大伸, 日本品質管理学会第46回年次大会, 2016

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川村 大伸 (KAWAMURA, Hironobu)
名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究
院)・准教授
研究者番号：50548261

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()