

반도체 포토 공정 스케줄링을 위한 시스템 설계

김 정 우*

Photolithography Job Scheduling Model in Semiconductor Manufacturing: A MILP-based Approach

Jeong Woo Kim*

요 약

반도체 제조에서 포토 공정은 설비 용량, 고가의 장비, 재진입 공정흐름 등과 같은 특성으로 인해 스케줄링 문제가 매우 중요한 공정 중 하나이다. 그러나 현실적으로 한정적인 설비자원을 공유하는 작업들의 스케줄링 문제를 푸는데 많은 어려움을 겪고 있다. 본 논문에서는 공유설비, 제조시간, 할당 우선순위 및 고객 수요 납기 등 반도체 칩 생산을 위한 현실적 제약조건들이 반영된 혼합정수선형계획법(Mixed-integer linear programming) 모델을 제안하여 작업 우선순위에 따른 설비할당 및 셋업을 고려한 포토 공정의 효율적 작업 스케줄링 모델을 구축하고자 한다. 최적화 스케줄링 모형은 반도체 제조 특성을 반영한 샘플 데이터를 통해 검증하였다.

Abstract

Photolithography is a critical and capacity-constrained process in semiconductor manufacturing, characterized by high equipment costs, re-entrant flows, and facility utilization. This paper proposed a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model for job scheduling in the photolithography process, considering realistic constraints such as machine sharing, process time, allocation priority, and due dates. The model is validated using sample data, and its formulation takes into account the characteristics of semiconductor manufacturing.

Keywords

semiconductor manufacturing, photolithography, scheduling, optimization methodology

1. 서 론

포토(Photolithography) 공정은 웨이퍼 위에 반도체 패턴을 입히는 과정으로, 반도체 제조 공정 중에서도 공유설비(반도체 물류가 여러 설비를 공유), 긴

제조시간, 공정의 복잡성, 다양한 혼합제품 특성 등으로 인해 잡(Job) 스케줄링 문제가 현실적으로 매우 어려운 공정으로 알려져 있다. 본 논문에서는 공정 내 잡들을 효율적으로 설비에 할당하여 총 완료시간(Makespan) 단축이 가능하도록 하는 혼합정수선형계

* 선문대학교 경영학과 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4538-7029>

· Received: Jun. 25, 2025, Revised: Jul. 14, 2025, Accepted: Jul. 17, 2025
· Corresponding Author: Jeong Woo Kim
Dept. of Business Administration, Sunmoon University, Sunmoon-ro 221, Asan-si, Chungcheongnam-do, Korea
Tel.: +82-41-530-8377, Email: hero4u30@sunmoon.ac.kr

획법(MILP, Mixed-Integer Linear Programming) 기반의 스케줄링 방법론을 제안하고자 한다. 반도체 팹(Fabrication) 공정을 대상으로 한 작업 스케줄링 기법은 다양한 분야에서 폭넓게 연구되어 왔다. [1]은 스케줄링 이론에 대한 포괄적인 기초를 제공하며, [2]는 반도체 제조 환경에서 시뮬레이션 기반 스케줄링 기법을 연구하고 제안하였다. 포토 공정에 특화된 연구로는 [3][4]를 통해 재진입 공정 흐름, 셋업 시간, 배치(Batch) 문제 등을 고려하여 MILP에 기반한 최적화 모형과 휴리스틱 스케줄링 프레임워크를 제안하였다. [5]는 웨이퍼-고객 주문을 매칭하여 고객 납기를 만족시키기 위한 웨이퍼 할당 최적화 모형을 개발하였다. 설비 가용능력을 고려한 용량 할당 문제를 풀기 위해 혼합정수선형계획법 기반의 최적화 모형을 제안하고, 실제 제조 데이터에 기반한 실험 결과를 통해 적용 가능성을 검증하였다[6]. [7]은 일반적인 생산공정 하에서 일정계획 수립 문제를 풀기 위한 알고리즘을 개발하여 제안하였다. [8]에서는 생산량, 평균 플로우 타임, 평균 가중지연 시간 등의 제약조건을 만족하는 최적화 모델을 개발하여 적용하였으며, 포토 공정을 대상으로 스케줄링 문제를 풀기 위한 혼합정수계획법을 적용하여 총 가중지연 문제를 최소화하도록 하였고 제약 프로그래밍과의 비교분석을 통해 결과를 검증하였다[9].

기존에 진행된 연구들은 생산량 최대화를 위해 다양한 제약조건들이 반영된 최적화 방법론 관점에서 주로 연구가 진행되었으나, 본 연구는 작업의 우선순위에 따른 효율적 스케줄링을 위해 설비 할당 및 셋업 제약을 고려하여 총 작업시간을 최소화하고자 하는데 그 목적이 있다.

II. MILP 기반 최적화 모델

본 논문에서는 포토공정을 대상으로 잡 스케줄링을 위한 최적화 모델링을 개발하여 적용하고자 한다. 포토 공정은 다양한 웨이퍼 로트를 제한된 수의 장비에 할당하여 처리하는 과정으로, 각 설비별 작업시간, 가용여부, 셋업타임 등이 상이하다. 각 작업은 릴리즈 시간과 수요납기가 존재하며 생산량을 최대화하고 셋업타임을 최소화하기 위해 대기 및

잡 체인지 없이 연속적인 처리가 요구된다. 이에 이러한 제약조건을 만족하면서 작업들을 장비에 효율적으로 할당하고 작업 시작 시간을 결정하여 전체 가중지연합(Total weighted tardiness)을 최소화하는 것을 목표로 한다.

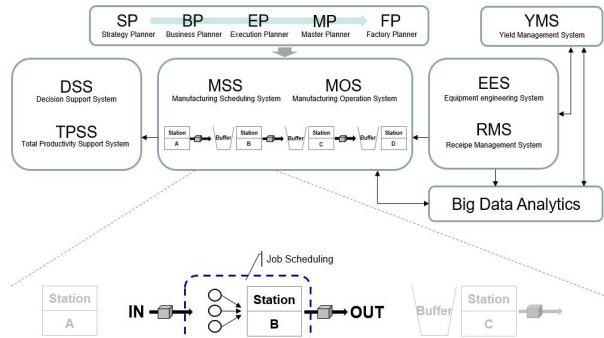


그림 1. 생산시스템 프레임워크
Fig. 1. Framework of manufacturing process

그림 1은 반도체 제조업 기반의 전체 생산 시스템 프레임워크를 보여주고 있으며 본 논문에서 제안하는 최적화 스케줄링 모델은 MSS(Manufacturing Scheduling System) 모듈에 적용하고자 하는 것을 목표로 한다.

Notations :

- J : 웨이퍼 종류
- M : 포토 설비
- T : 설비에서의 작업시간

Parameters :

- p_{jm} : 설비 m , 작업 j 프로세싱 타임
- r_j : 작업 j 의 릴리즈 시간
- d_j : 작업 j 의 작업 기한
- w_j : 작업 j 의 우선순위
- s_{jk} : 작업 j 에서 작업 k 로 전환 시 셋업타임
- δ_{jm} : 설비 m 에서 작업 진행 1, 아니면 0

Decision Variables :

- $x_{jmt} \in \{0, 1\}$: 작업 j , 설비 m , 시간 t 에서 진행되면 1
- C_j ; 작업 j 의 완료시간
- T_j : 작업 j 의 지연시간

Optimization model :

$$\text{Minimize } \sum_{j \in J} w_j T_j \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{m \in M} \sum_{t=r_j}^{d_j} x_{jmt} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$x_{jmt} \leq \delta_{jm} \quad \forall j, m, t \quad (3)$$

$$C_j \geq \sum_{m \in M} \sum_t (t + p_{jm}) \times x_{jmt} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$T_j \geq C_j - d_j, T_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{t \in T} T \times x_{jmt} + p_{jm} + s_{jk} \leq \sum_{t \in T} t \times x_{kmt} + H \times (1 - j_{jkm}) \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T} t \times x_{kmt} + p_{km} + s_{kj} \leq \sum_{t \in T} t \times x_{jmt} + H \times j_{jkm} \quad (7)$$

$$y_{jkm} + y_{kjm} \leq 1 \quad \forall j \neq k, \forall m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} x_{jmt} \leq \text{capacity}_{mt} \quad \forall j, m, t \quad (9)$$

식 (1)은 목적함수를 표현하고 있으며 모든 잡을 할당한 결과, 전체 가중 지연의 합을 최소화하고자 한다. 식 (2) 제약식은 각 잡은 한번에 하나의 설비에만 할당 가능하고 식 (3)은 할당되는 잡은 그 작업이 가능한 설비에만 할당되어야 함을 의미한다. 식 (4)는 설비에서 작업이 끝나는 제약을 식 (5)는 작업의 지연시간을 계산하기 위함이다. 식 (6)-(9)에서는 잡 체인지 시 설비의 중복이 발생되지 않도록 하는 제약이다.

III. 실험 결과

본 논문에서 제안된 MILP 기반 최적화 모형의 검증을 위해 실제 반도체 생산라인을 단순화하고 샘플데이터를 구성하여 활용하였다. 실험은 세 개의 작업이 우선순위에 의해 설비에 할당되도록 하여 총 지연시간을 최소화할 수 있도록 하였다. MILP

모델은 Gurobi Optimizer 기반으로 구현되었으며, 모든 제약조건(릴리즈 타임, 완료시간, 장비 적합성 등)을 고려하여 최적 스케줄을 도출하였다.

릴리즈 타임은 각 작업이 시작 가능한 가장 이른 시간(Earliest start time)을, 완료시간(Earliest end time)은 가능한 한 작업이 가장 빠른 시간에 끝낼 수 있도록 하는 시점을 의미한다. 사용 가능한 장비는 각 작업이 실행될 수 있는 포토장비이며, 우선순위 가중치는 작업의 중요도를 나타내고 총 지연 가중치를 최소화할 수 있도록 작업들이 할당된 결과를 표 1에서 보여주고 있다.

표 1. 공정 스케줄링을 위한 작업 할당 결과
Table 1. Result of job scheduling

Job	Release time	Completion time	Processing time	Facility	Priority
J1	0	500	54,032	M1, M2	2
J2	50	1,000	84,000	M2	3
J3	100	2,000	354,003	M1, M3	1

J2 작업은 가장 높은 우선순위(가중치: 3)로 장비 M2에 할당되어 지연을 최소화 하였다. J1 작업은 장비 M1에 할당되어 마감시간 이전에 완료가 되었다. J3 작업은 낮은 우선순위로 인해 장비 M3에 지연되어 할당되었으나, 최종완료 시간에 완료될 수 있도록 하여 전체 가중지연 합을 최소화하면서 총 작업완료시간도 최소화할 수 있도록 하였다. 이는 모든 작업은 제약조건을 만족하면서 할당되었으며, 생산성 저하 문제를 발생시키지 않고 작업의 중요도에 따라 지연을 최소화하는 효과적인 스케줄링이 가능하도록 하였다.

그림 2에서는 포토 설비에 우선순위에 의해 작업들이 할당된 결과를 보여주고 있다. 예를 들어, J1 작업의 경우 M1 설비에 0부터 120분 동안 설비를 점유하고 작업이 수행되었음을 의미한다.

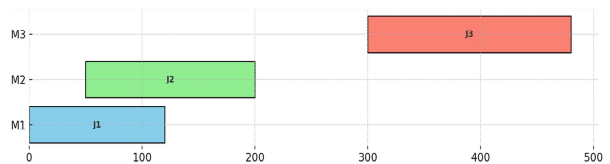


그림 2. 작업 스케줄링 결과
Fig. 2. Result of job scheduling

IV. 결 론

본 논문에서는 반도체 포토 공정을 대상으로 실제 생산라인에서 고려되는 제약조건들을 반영한 MILP 기반 스케줄링 모델을 제안하였다. 이 모델을 통해 공정 및 반도체 제품의 복잡화에 대응하고 고객 수요만족을 위한 납기 지연 문제를 해결할 수 있을 것으로 기대된다. 반도체 칩 공정의 복잡성과 제품 다각화로 인한 다품종 소량생산 체계로 인해 본 연구에서 제안된 MILP 기반의 스케줄링 모형을 양산 프로세스에 바로 적용하기에는 무리가 있을 수 있다. 이에 우선적으로 고객 샘플(CSP, Customer Sample Plan) 체계를 대상으로 스케줄링 모형이 적용될 수 있도록 추후 실험 데이터 사이즈를 높여 다양한 작업들의 스케줄링 결과를 검증해 보고자 한다.

References

- [1] M. Pinedo, "Scheduling: Theory, Algorithm, and System", Springer, 1994.
- [2] L. Monch, J. Fowler, and S. Mason, "Production Planning and Control of Semiconductor Wafer Fabrication Facilities", Springer Series in Advanced Manufacturing, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4472-5>.
- [3] C. R. Glassey and M. G. C. Resende, "A scheduling rule for job release in semiconductor fabrication", *Operations Research Letters*, Vol. 1, No. 1, pp. 36-46, Oct. 1988. [https://doi.org/10.1016/0167-6377\(88\)90033-8](https://doi.org/10.1016/0167-6377(88)90033-8).
- [4] C. Habla, L. Monch, and R. Driebel, "A Finite Capacity Production Planning Approach for Semiconductor Manufacturing", *Proc. of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, Scottsdale, AZ, USA, pp. 82-87, Sep. 2007. <https://doi.org/10.1109/COASE.2007.4341734>.
- [5] C. D. Patrik, A. Jelle, and A. Alp, "Optimizing class-constrained wafer-to-order allocation in semiconductor back-end production", *Journal of Manufacturing system*, Vol. 57, pp. 72-81, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.022>.
- [6] G. Amir, A. Radhia, L. Georg, E. Kamil, and H. Cathal, "Optimizing capacity allocation in semiconductor manufacturing photolithography area-case study:Robert Borch", *Journal of Manufacturing System*, Vol. 54, pp. 123-137, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.11.012>.
- [7] S. U. Lee, "Job Shop Scheduling Algorithm", *Journal of KIIT*, Vol. 11, No. 5, pp. 157-166, May 2013. <https://doi.org/10.14801/kiitr.2013.11.5.157>.
- [8] C. T. Huang, T. J. Hsieh, M. T. Lin, "Data-driven for the photolithography process in semiconductor manufacturing", *American Institute of Mathematical Sciences*, Vol. 21, pp. 1946-1963, Mar. 2025. <https://doi.org/10.3934/jimo.2024157>.
- [9] S. C. Madathil, S. Nambiar, S. J. Mason, M. E. Kurz, "On Scheduling a Photolithography area containing cluster tool", *Computer and Industrial Engineering*, Vol. 121, pp. 177-188, Jul. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.036>.