RunSheet (증착 작업 지시서)

Runsheet : 설계된 박막을 실제 장비에서 정확히 재현하기 위한 **실행·제어 시나리오**

Runsheet의 핵심 역할 6가지

① 공정 실행 기준 제공 (Execution Plan)

각 층의 증착 순서, 종료 조건, 모니터 방식(QCM / Optical)

→ **작업자가 그대로 실행 가능**

② 모니터 신호 → 공정 제어

QCM 두께, 광학 반사/투과 신호

→ **언제 셔터를 닫을지 결정**

📌 설계 두께가 아니라 **모니터 신호 기준**으로 제어

③ Tooling Factor 적용

QCM/광학 모니터 ↔ 실제 배치 기판 차이 보정

Constant / Dynamic TF 반영

→ **실제 기판 두께 정확도 확보**

④ 장비 구성 고정

Machine configuration : 입사각, 편광, 모니터 위치

👉 **Runsheet 하나 = 장비 설정 하나**

⑤ 재현성 확보

동일 Runsheet 재사용, 오퍼레이터 차이 제거, 공정 조건 기록

⑥ Simulator와의 연결

Simulator: 신호 변화 예측

Runsheet: : 실제 공정에 적용

→ 사전 검증 가능

QCM / 광학 모니터에서의 Runsheet 역할 차이

QCM 기준

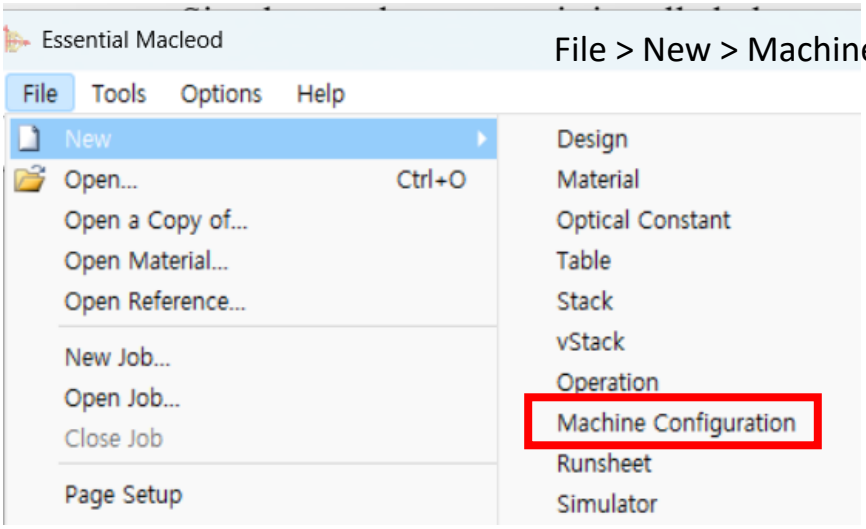
- 물리 두께 도달 시 종료
- Tooling Factor 필수
- 재료 의존성 낮음

광학 모니터 기준

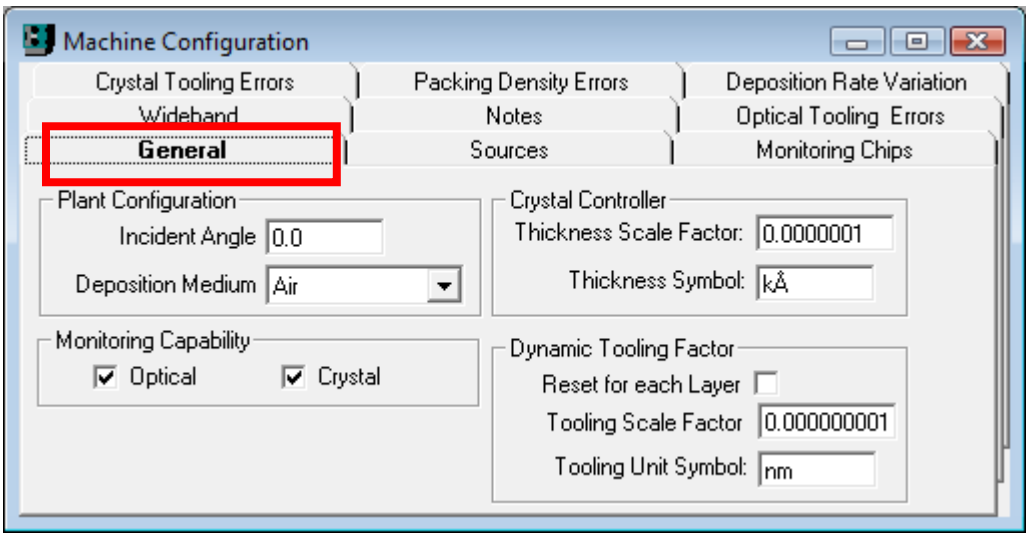
- 간섭 신호 기준 종료
- 파장/편광/칩 중요
- 광학 특성 직접 제어

Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

RunSheet를 사용하려면 Machine Configuration 파일 1개가 필요 합니다.



General Tab

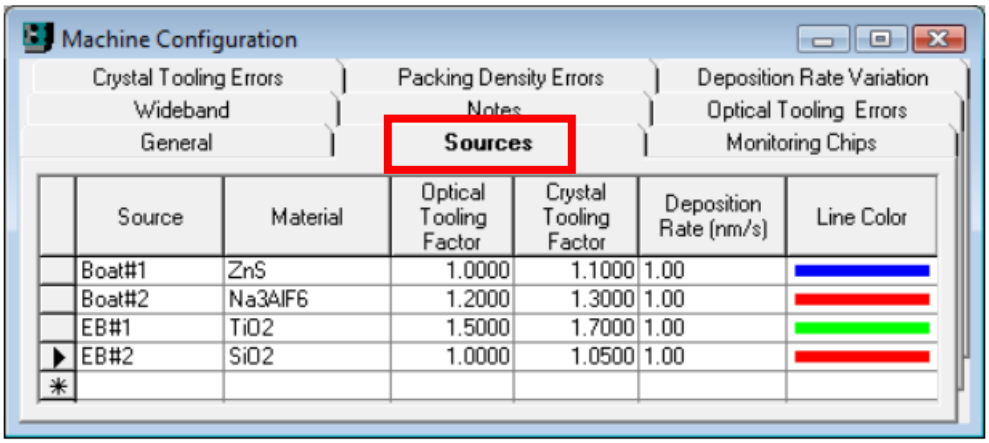


입사각(incident angle)은 오직 광학 모니터(optical monitor)에만 적용된다.
경사 입사(oblique incidence)의 경우 광의 편광(polarization)이 중요하며,
이는 런시트(Runsheet)에서 지정된다.

툴링 스케일 팩터(Tooling Scale Factor) : 동적 툴링 팩터 파일(Dynamic Tooling Factor files)에 저장되어 있는 두께 값(thickness values)에 적용된다.
동적 툴링 팩터를 사용하지 않는 경우에는 이 스케일 팩터는 사용되지 않는다.

Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

Sources Tab



Source	Material	Optical Tooling Factor	Crystal Tooling Factor	Deposition Rate (nm/s)	Line Color
Boat#1	ZnS	1.0000	1.1000	1.00	
Boat#2	Na3AlF6	1.2000	1.3000	1.00	
EB#1	TiO2	1.5000	1.7000	1.00	
EB#2	SiO2	1.0000	1.0500	1.00	

툴링 팩터(tooling factor)의 정의는 배치 기판(batch substrates)에 설계 두께 (design thickness)가 정확히 증착되었다는 가정에 기반한다.

따라서 배치 두께는 설계 두께와 정확히 동일하다.

이때 툴링 팩터는 **모니터(monitor)에서의 증착 속도**와 **배치 기판에서의 증착 속도**의 **비율**로 정의된다. 툴링 팩터가 1.0보다 작다는 것은 배치 기판에 비해 **모니터에 증착되는 양이 더 적다**는 것을 의미한다.

런시트(Runsheet)는 항상 **배치 기판의 올바른 두께**를 얻기 위해 **모니터 신호**를 표시한다.

툴링 팩터는 상수(constant)일 수도 있고, **동적(dynamic)**, 즉 가변적일 수도 있다.

툴링 팩터가 상수인 경우, 증착 전 과정에서 모니터 두께는 **배치 증착 속도에 툴링 팩터를 곱한 속도**로 증가하며, 그 결과 모니터 두께는 단순히 총 배치 두께(즉, 설계 두께)에 툴링 팩터를 곱한 값이 된다.

예를 들어, 툴링 팩터가 0.5이고 설계 두께가 100 nm라면, 모니터 두께는 50 nm가 된다.

"**모니터가 보는 증착량과 실제 기판이 받는 증착량이 다르다**"는

모니터가 측정한 증착량 > **실제 기판에 쌓인 두께**로 변환해 주는 **물리적 보정 계수**이다.

두 가지 유형의 dynamic tooling factor

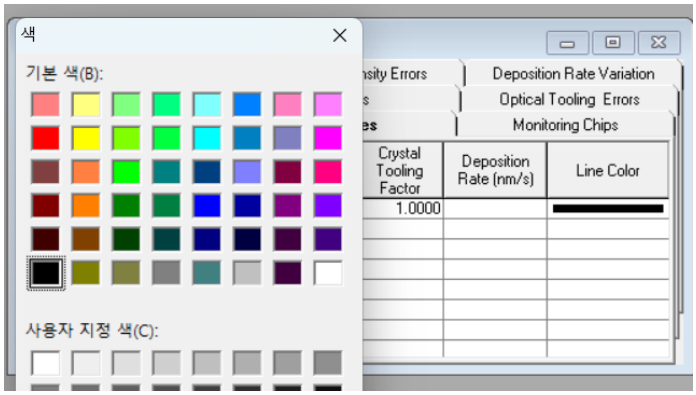
Type 1은 "한 층 안에서 증착 환경이 변하는 현실적인 모델"이고,

Type 2는 "층마다 다른 증착 조건을 적용하는 단순한 모델"이다.

Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

항목	Type 1 (연속형)	Type 2 (층별형)
TF 변화	두께에 따라 연속 변화	층마다 상수
물리 원인	소스 상태 변화	재료/조건 변경
수학적 처리	적분(평균)	단순 곱
현실성	매우 높음	단순·실용적
설정 난이도	높음	낮음

Deposition Rate(증착 속도) 열은 Simulator에서만 사용되며, Runsheet에서는 사용되지 않는다.

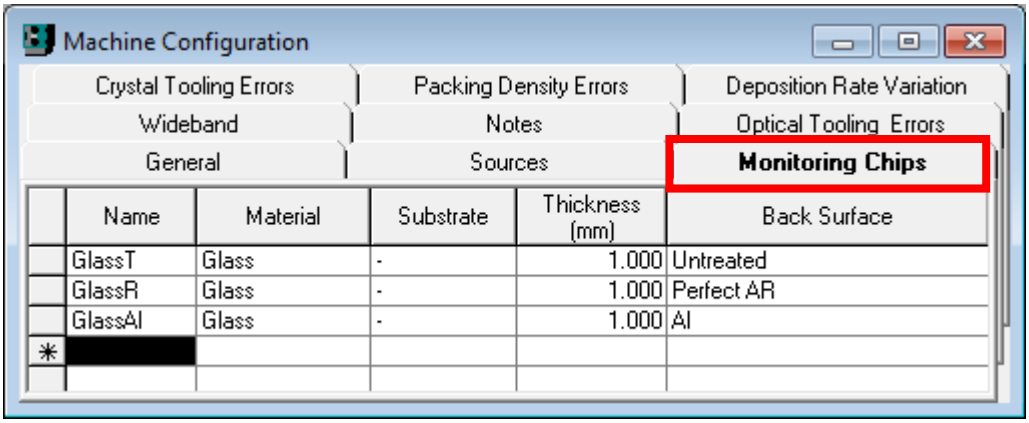


Color는 Plot에서 보여지는 색상으로

해당 라인을 더블클릭 하여

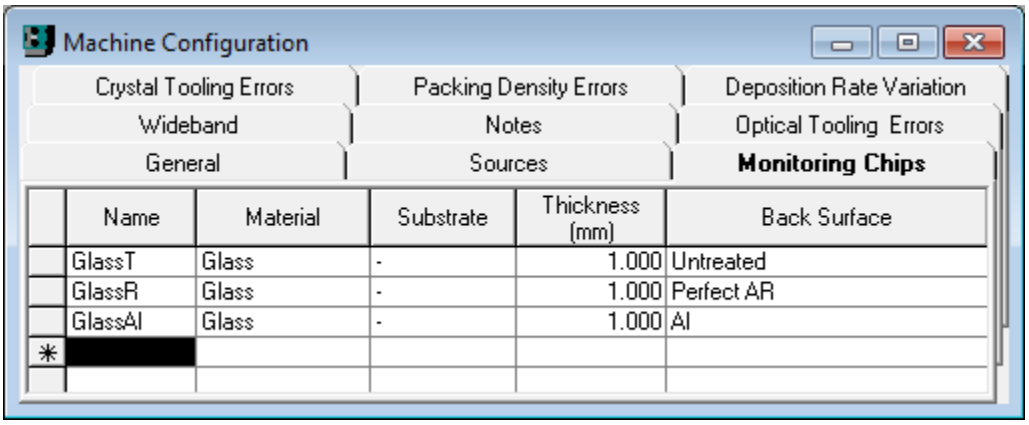
색상 창에서 선택 설정

Monitoring Chips Tab



Copyright ⓒ 디지크라식
http://www.thinfilm.co.kr

여러 종류의 모니터링 칩(monitoring chip)이 있을 수 있다.
여기에서는 그중 **세 가지**만을 보여준다. 칩의 명칭은 어떤 방식으로든 지정할 수 있지만,
칩의 종류를 알 수 있는 이름을 포함하는 것이 가장 유용하다.
예를 들어, **GlassAl**이라는 유리 칩은 **후면이 불투명하게 코팅된(opaquely coated) 칩**이다.
칩의 후면(rear surface)은 다음과 같이 다양한 처리가 가능하다.
반사를 제거하기 위한 **완전한 AR 코팅(Perfect AR) 무코팅** 또는 기타 표면 처리
기존 재료 중 하나를 **매우 두껍게(thick)** 후면에 추가 일반적으로 이러한 칩에 적용되는
코팅은 **금속 코팅**이며, 해당 칩은 **흡수성(absorbing) 박막**의 증착에 사용된다.
여기 제시된 예에서는 **알루미늄으로 후면이 코팅된 경우**를 보여준다.
각 칩은 1이 아닌 내부 투과율(internal transmittance)을 가질 수 있다.
내부 투과율은 **재료(Material) 파일**에 저장된다. 다만, **이전 버전의 재료 데이터베이스**에서는
내부 투과율 정보가 **별도의 Substrate 파일**에 저장되어 있었다.
이 경우, Substrate 열(column)에서 해당 Substrate 파일을 선택할 수 있다.
칩 두께(chip thickness)는 **기판(substrate)을 지정할 때 사용하는 단위**(표준 버전에서는
밀리미터)를 사용하여 입력된다.
다만, 재료가 무손실(lossless)인 경우에는 칩 두께는 중요하지 않다.



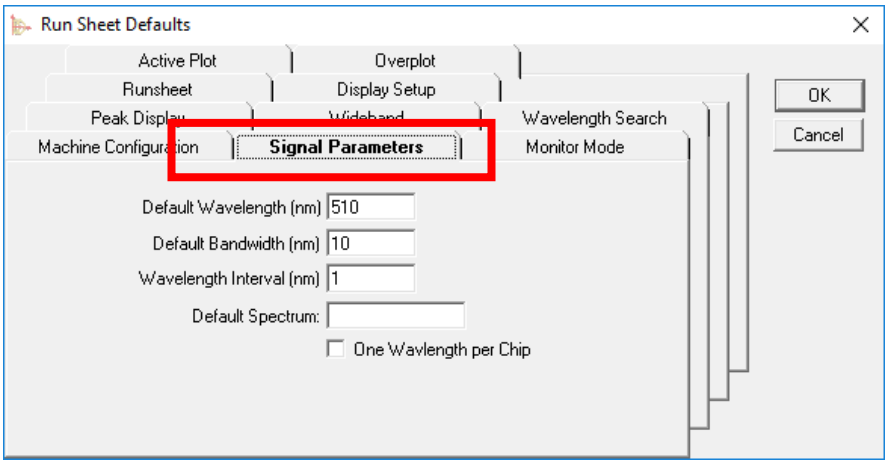
	Name	Material	Substrate	Thickness (mm)	Back Surface
	GlassT	Glass	-	1.000	Untreated
	GlassR	Glass	-	1.000	Perfect AR
	GlassAl	Glass	-	1.000	Al
*					

Name 과 Thickness만 직접 입력 나머지는 창에서 선택 설정

사용자는 원하는 만큼 여러 가지 machine configuration을 만들 수 있지만,
하나의 런시트(Runsheet)에는 오직 하나의 구성만 지정할 수 있다.

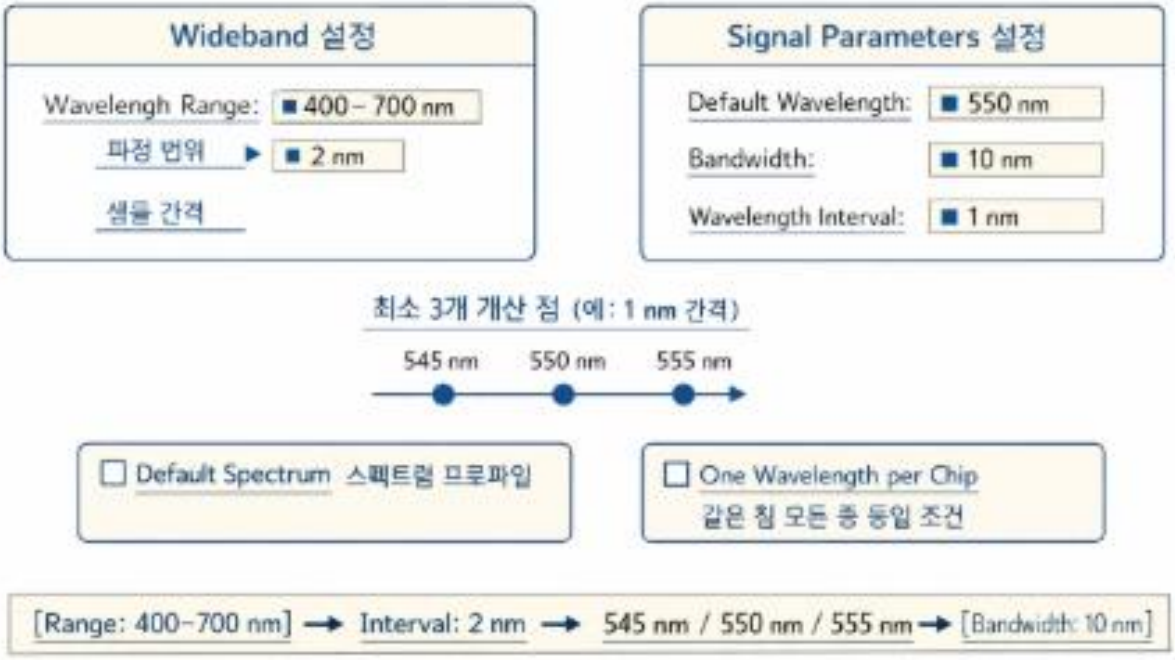
Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

Signal Parameters



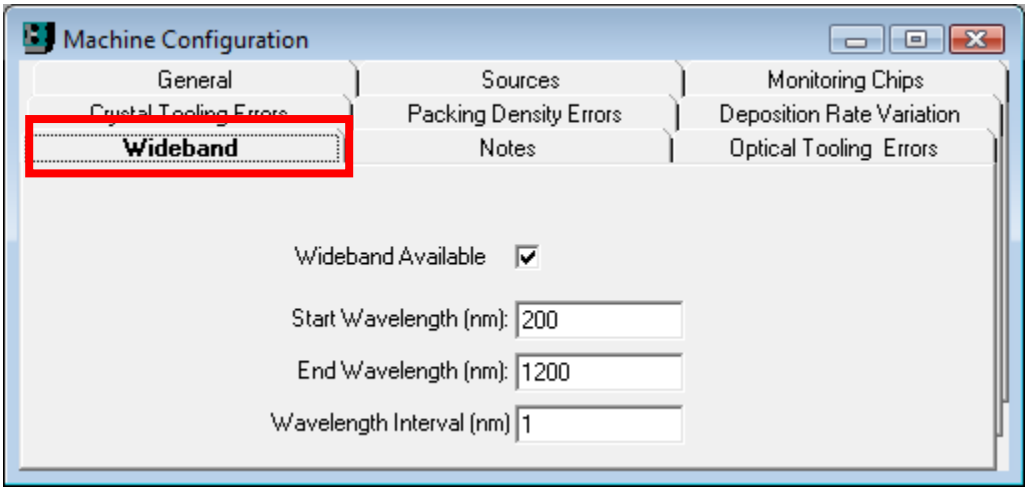
One Wavelength per Chip: Runsheet의 기본 동작을 설정하며,

같은 witness chip에 증착되는 모든 층(layer)에 대해 모니터 신호 조건을 동일하게 강제한다.



Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

Wideband Tab



Wideband 탭은 광대역 광학 모니터 계산에 사용할
파장 범위(wavelength range)와 간격(interval)을 지정한다.

Runsheet에서의 QCM , Optical Monitor 활용 방식

QCM (Quartz Crystal Microbalance)

QCM은 주로 **증착 속도(Rate Control)**를 일정하게 유지하기 위해 사용됩니다.

•**Tooling Factor 설정:** 기판과 센서의 위치 차이를 보정하는 수치를 Runsheet에 명시해야 합니다.

•**Termination(종료) 조건:** 설정한 타겟 두께(Physical Thickness)에 도달하면 셔터를 닫도록 설정합니다.

•**활용 팁:** 다층막 공정에서 각 층의 물리적 두께가 중요할 때 사용하며, 증착 시작부터 끝까지 안정적인 속도를 유지하는 데 초점을 맞춥니다.

광학 모니터 (Optical Monitor)

광학 모니터는 빛의 간섭 현상을 이용하므로, **광학적 두께(nd)**가 중요한 필터 제작에 필수적입니다.

•**Monitoring Wave (감시 파장):** 특정 파장에서 반사율이나 투과율의 극대값(Peak)을 확인하여 층을 종료합니다. Runsheet에는 타겟 파장을 반드시 기입합니다.

•**Turning Point 제어:** 1/4 파장($₩lambda/4$)의 배수에서 나타나는 반전 지점을 포착하여 증착을 멈춥니다.

•**활용 팁:** 굴절률 변화에 따른 오차를 스스로 보정하는 효과(Self-compensating)가 있어, 정밀한 광학 소자 제작 시 Runsheet의 신뢰도를 높여줍니다.

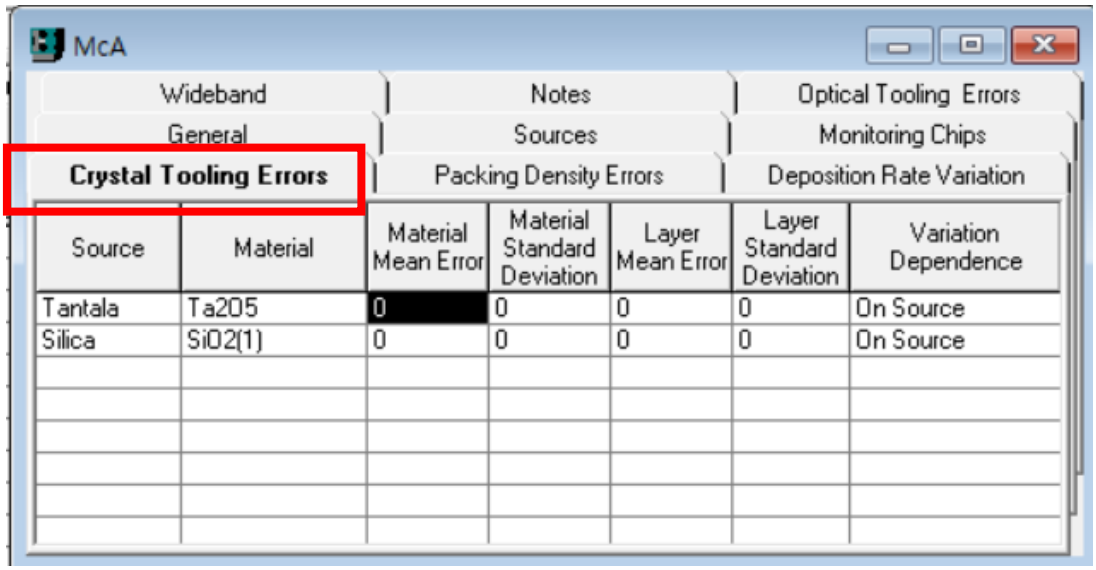
Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

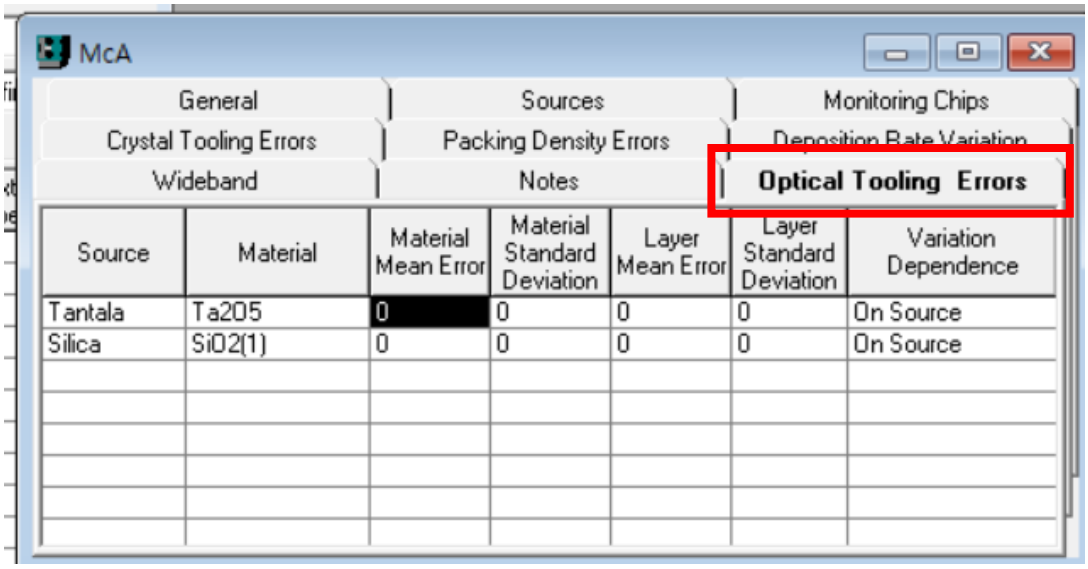
실무적인 결합 활용 (Hybrid 전략)

현장에서는 두 방식을 함께 사용하는 경우가 많습니다.

1.Rate는 QCM으로: 증착 속도가 불안정하면 박막의 질이 변하므로, QCM으로 소스 출력을 실시간 제어합니다.

2.Cut-off는 광학으로: 최종 두께 결정은 광학 모니터의 신호를 따라감으로써, 실제 제품이 가질 광학 특성을 보장합니다.





Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

Machine Configuration file 작성, 저장 후, 해당 디자인 파일 작성

Edge Filter Design

N-BK7 : Substrate, NOA83H : Medium

Formula: (HL)^17 H with H (Ta2O5), L(SiO2)

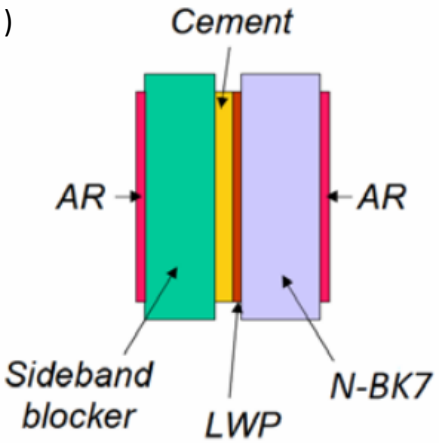
Simple Specification:

600nm - 50% transmittance

Low ripple to 850nm

No short-wave sidebands

Materials Ta2O5 and SiO2

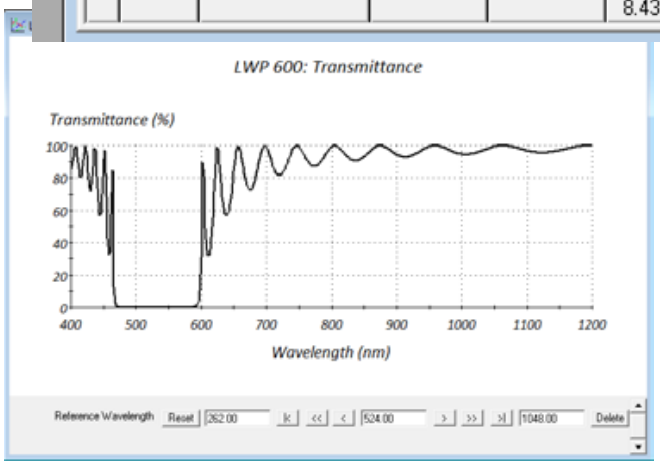


LWP 600

Design | Context | Notes

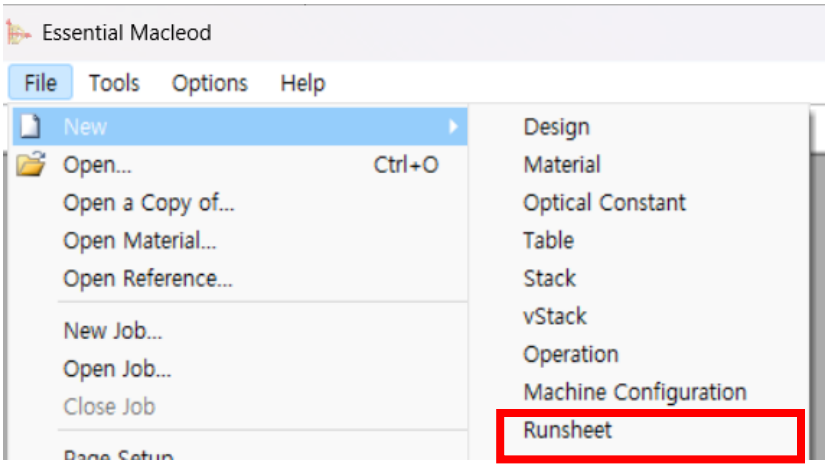
Incident Angle (deg)	0.00
Reference Wavelength (nm)	524.00

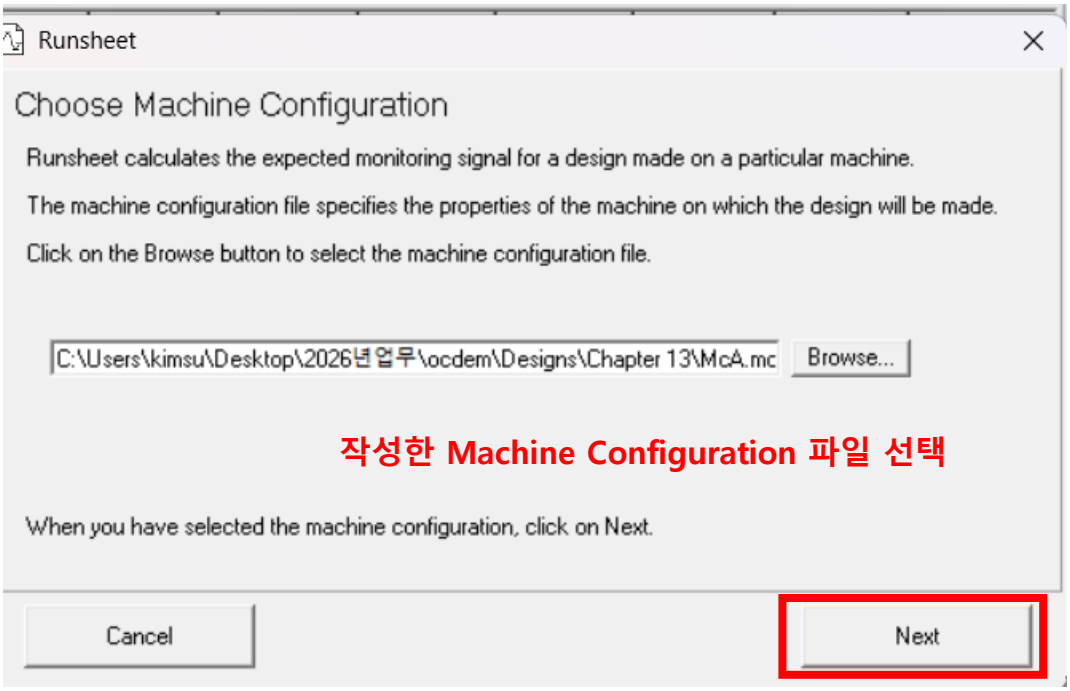
	Layer	Material	Refractive Index	Extinction Coefficient	Optical Thickness (FWOT)	Physical Thickness (nm)	Lock
▶	Medium	NOA83H	1.56000	0.00000			
	1	Ta2O5	2.14327	0.00000	0.19586678	47.89	No
	2	SiO2(1)	1.46113	0.00000	0.16145722	57.90	No
	3	Ta2O5	2.14327	0.00000	0.25874079	63.26	No
	4	SiO2(1)	1.46113	0.00000	0.28058124	100.62	No
	5	Ta2O5	2.14327	0.00000	0.19631062	48.00	No
	31	Ta2O5	2.14327	0.00000	0.19607861	47.94	No
	32	SiO2(1)	1.46113	0.00000	0.28125784	100.87	No
	33	Ta2O5	2.14327	0.00000	0.25833675	63.16	No
	34	SiO2(1)	1.46113	0.00000	0.16908912	60.64	No
	35	Ta2O5	2.14327	0.00000	0.18465125	45.14	No
	ubstrate	BK 7	1.52001	0.00000			
					8.43237022	2534.41	

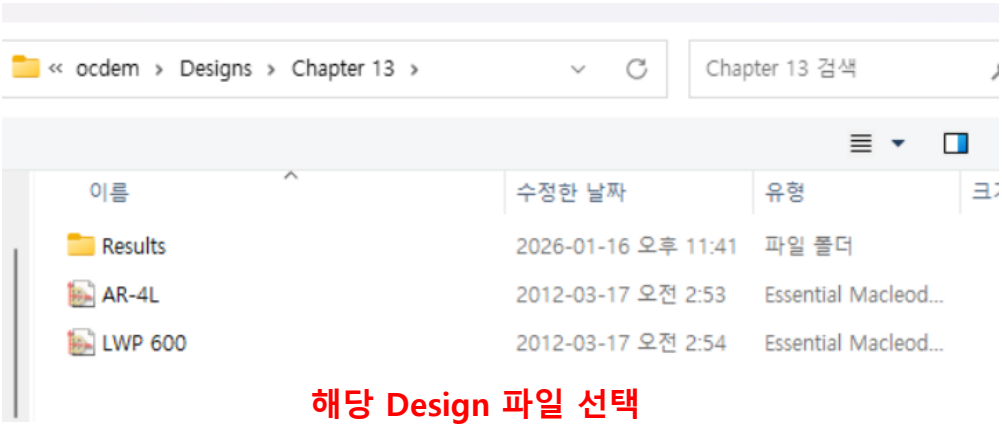


Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

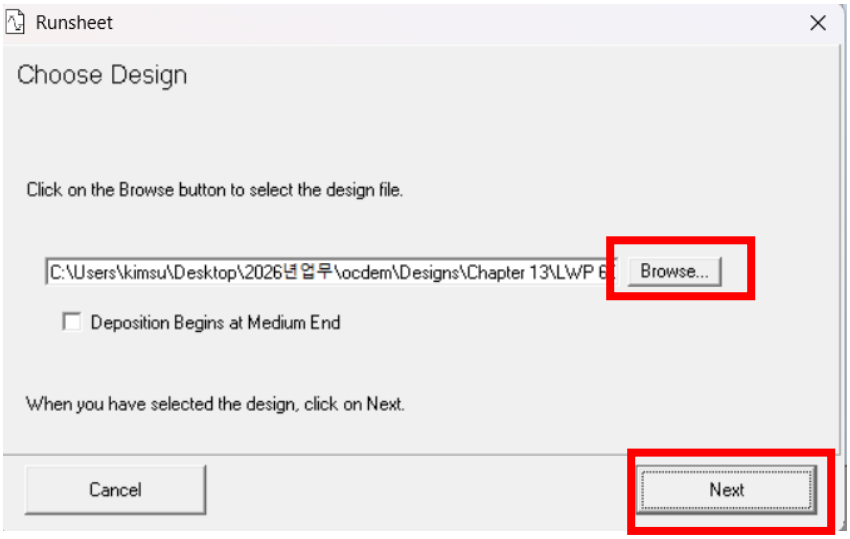
File > New > Runsheet

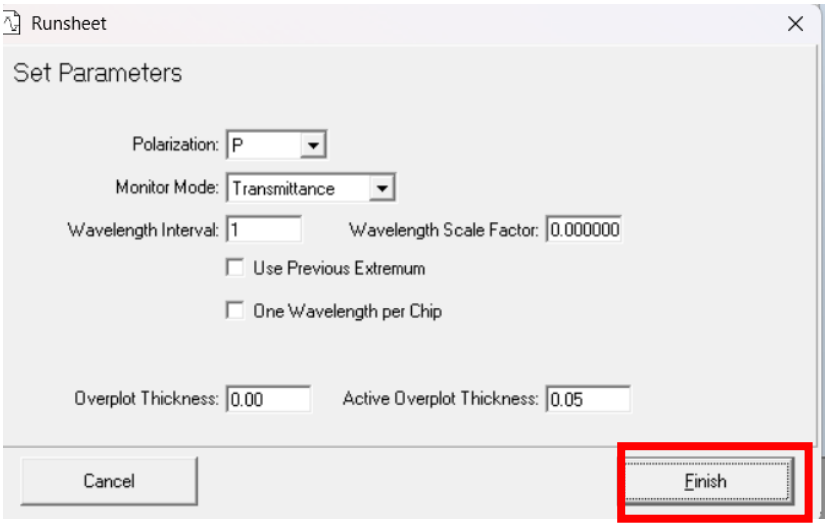




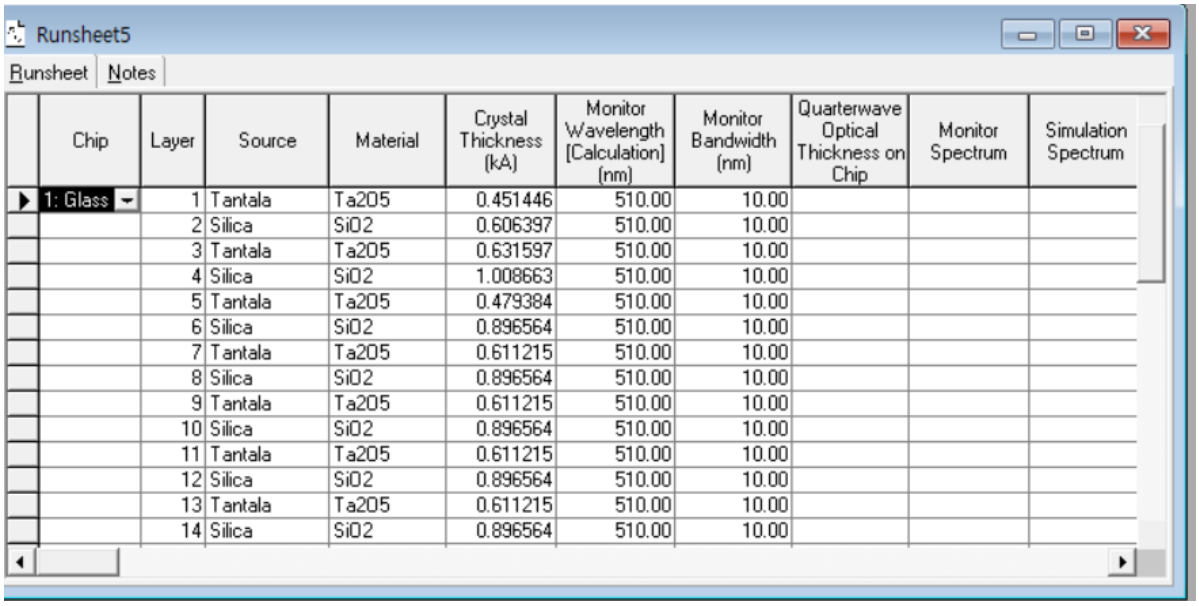


Copyright ⓒ 디지크라식
http://www.thinfilm.co.kr





RunSheet 파일 생성

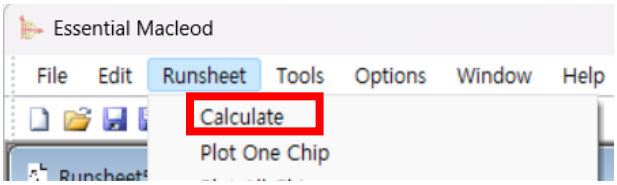


Runsheet5

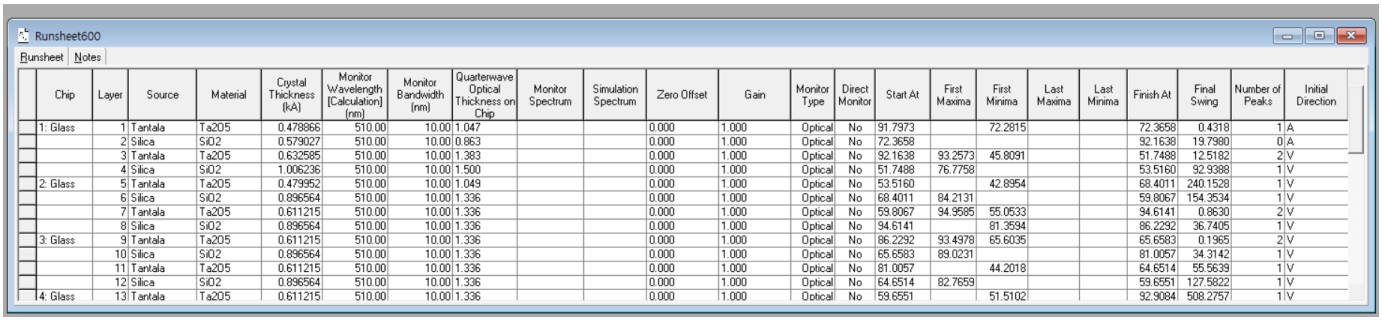
Runsheet | Notes

Chip	Layer	Source	Material	Crystal Thickness (kA)	Monitor Wavelength [Calculation] (nm)	Monitor Bandwidth (nm)	Quarterwave Optical Thickness on Chip	Monitor Spectrum	Simulation Spectrum
1: Glass	1	Tantala	Ta2O5	0.451446	510.00	10.00			
	2	Silica	SiO2	0.606397	510.00	10.00			
	3	Tantala	Ta2O5	0.631597	510.00	10.00			
	4	Silica	SiO2	1.008663	510.00	10.00			
	5	Tantala	Ta2O5	0.479384	510.00	10.00			
	6	Silica	SiO2	0.896564	510.00	10.00			
	7	Tantala	Ta2O5	0.611215	510.00	10.00			
	8	Silica	SiO2	0.896564	510.00	10.00			
	9	Tantala	Ta2O5	0.611215	510.00	10.00			
	10	Silica	SiO2	0.896564	510.00	10.00			
	11	Tantala	Ta2O5	0.611215	510.00	10.00			
	12	Silica	SiO2	0.896564	510.00	10.00			
	13	Tantala	Ta2O5	0.611215	510.00	10.00			
	14	Silica	SiO2	0.896564	510.00	10.00			

Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr



Runsheet > Caculate



Runsheet600

Runsheet | Notes

Chip	Layer	Source	Material	Crystal Thickness (kA)	Monitor Wavelength [Calculation] (nm)	Monitor Bandwidth (nm)	Quarterwave Optical Thickness on Chip	Monitor Spectrum	Simulation Spectrum	Zero Offset	Gain	Monitor Type	Direct Monitor	Start At	First Maxima	First Minima	Last Maxima	Last Minima	Finish At	Final Swing	Number of Peaks	Initial Direction
1: Glass	1	Tantala	Ta2O5	0.478866	510.00	10.00	1.047			0.000	1.000	Optical	No	91.7973		72.2815			72.3658	0.4318	1	A
	2	Silica	SiO2	0.579027	510.00	10.00	0.863			0.000	1.000	Optical	No	72.3658					92.1638	19.7980	0	A
	3	Tantala	Ta2O5	0.632585	510.00	10.00	1.383			0.000	1.000	Optical	No	92.1638	93.2573	45.8091			51.7488	12.5182	2	V
	4	Silica	SiO2	1.006236	510.00	10.00	1.500			0.000	1.000	Optical	No	51.7488	76.7758				53.5160	92.9388	1	V
2: Glass	5	Tantala	Ta2O5	0.479952	510.00	10.00	1.049			0.000	1.000	Optical	No	53.5160		42.8954			68.4011	240.1528	1	V
	6	Silica	SiO2	0.896564	510.00	10.00	1.336			0.000	1.000	Optical	No	68.4011	84.2131				59.8067	154.3534	1	V
	7	Tantala	Ta2O5	0.611215	510.00	10.00	1.336			0.000	1.000	Optical	No	59.8067	94.9585	55.0533			94.6141	0.8630	2	V
	8	Silica	SiO2	0.896564	510.00	10.00	1.336			0.000	1.000	Optical	No	94.6141		81.3594			86.2292	36.7405	1	V
3: Glass	9	Tantala	Ta2O5	0.611215	510.00	10.00	1.336			0.000	1.000	Optical	No	86.2292	93.4978	65.6035			65.6583	0.1965	2	V
	10	Silica	SiO2	0.896564	510.00	10.00	1.336			0.000	1.000	Optical	No	65.6583	89.0231				81.0057	34.3142	1	V
	11	Tantala	Ta2O5	0.611215	510.00	10.00	1.336			0.000	1.000	Optical	No	81.0057		44.2018			64.6514	55.5639	1	V
	12	Silica	SiO2	0.896564	510.00	10.00	1.336			0.000	1.000	Optical	No	64.6514	82.7659				59.6551	127.5822	1	V
4: Glass	13	Tantala	Ta2O5	0.611215	510.00	10.00	1.336			0.000	1.000	Optical	No	59.6551		51.5102			92.9084	508.2757	1	V

4 layer 마다 monitoring chip 적용, 해당 컬럼 선택,,

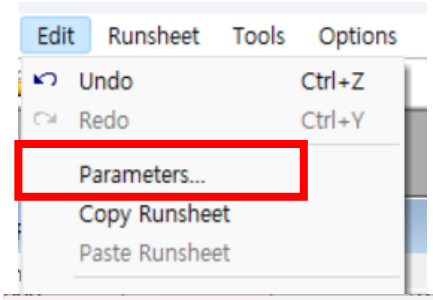
4 layers per chip (가장 흔함 ⭐)

신뢰도 vs 단순성의 황금비, 2주기 이상의 간섭 신호 확보,

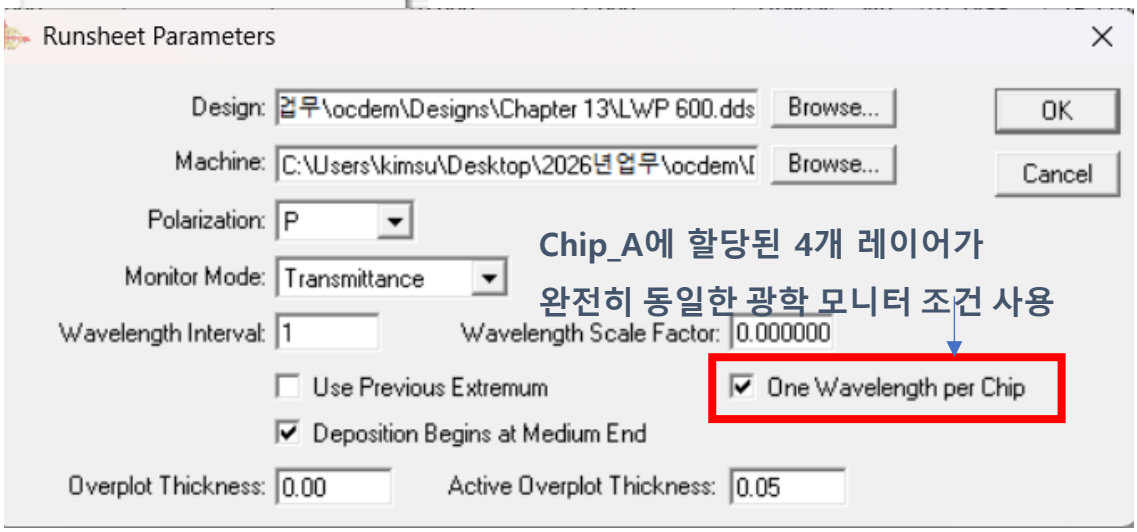
위상 오류 감지 가능, 광학 모니터의 **표준 설정**

이유: 신호 패턴이 명확,컷오프 판단 안정, 칩 수 과도하지 않음

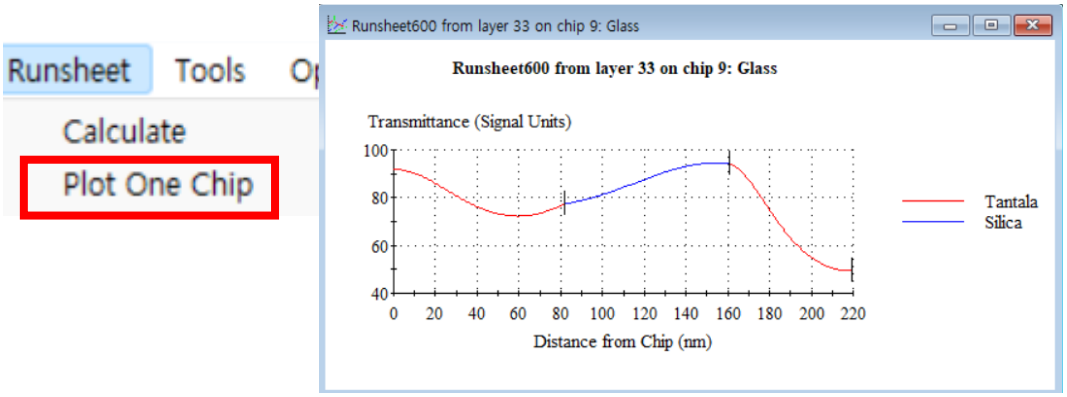
산업 표준에 가장 가까움



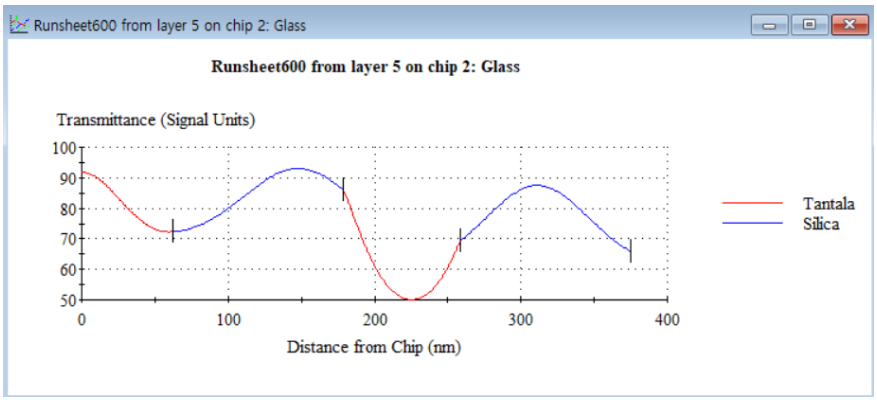
Edit > parameter



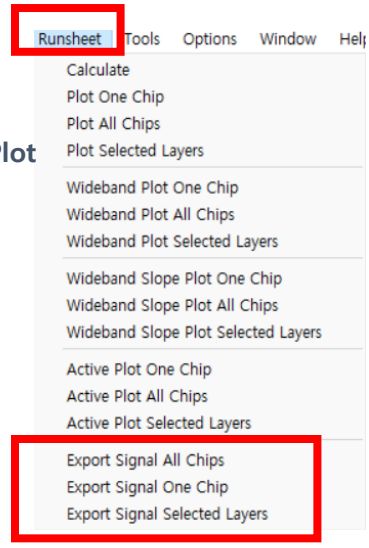
Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

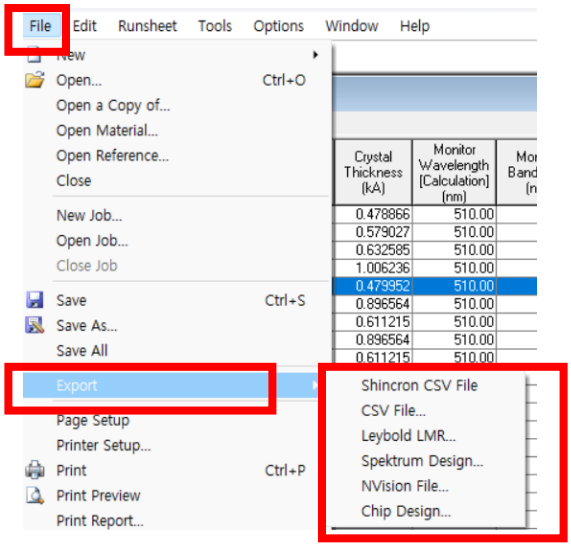


두 번째 칩 선택



다양한 Plot





RunSheet > Export

File > Export

Runsheet 파일은 다양한 파일 형식으로 전환, 사용이 가능 합니다.

Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

Simulator

실제 증착 공정을 가상으로 미리 돌려보는 기능

Design 계산은:

•이상적인 층 두께

•이상적인 광학 상수

•이상적인 간섭

하지만 **현실 공정은**:

•두께 오차

•툴링 팩터

•모니터 노이즈

•대역폭 효과

•QCM 위치 차이

📌 **Simulator는 이 현실 요소를 포함**

Simulator로 볼 수 있는 결과

1) 모니터 신호

• 실제 공정에서 보게 될 곡선

• overshoot / undershoot 예측

• **2) 실제 증착 두께**

• Design vs Deposited

• 레이어별 오차 누적

3) 최종 스펙트럼

• 목표 성능 vs 실제 성능

• 공정 민감도 평가

Simulator를 언제 써야 하나 ?

✅ **새 장비 세팅**

✅ **새 재료**

✅ **새로운 설계**

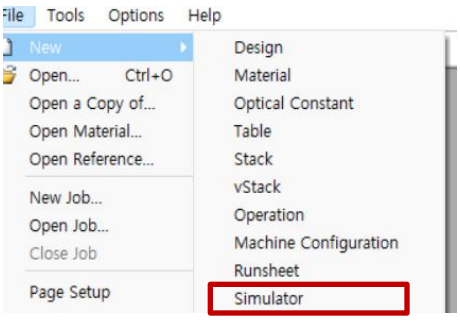
✅ **Layers per chip 변경**

✅ **Dynamic Tooling Factor 사용**

✅ **광학 모니터 첫 적용**

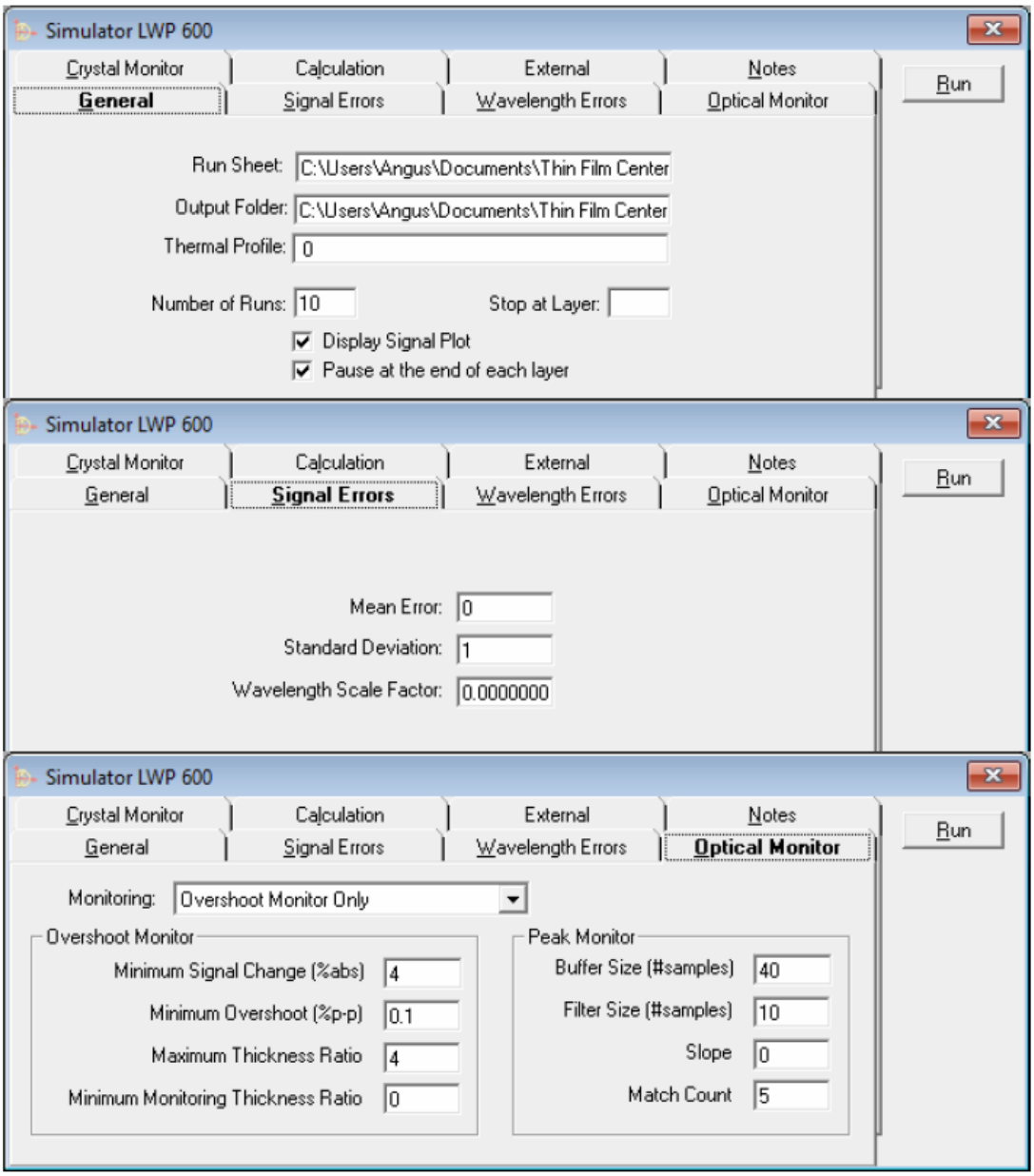
Simulator는 "Runsheet가 실제로 **성공할지 실패할지**"를
증착 전에 알려주는 유일한 도구다.

Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr

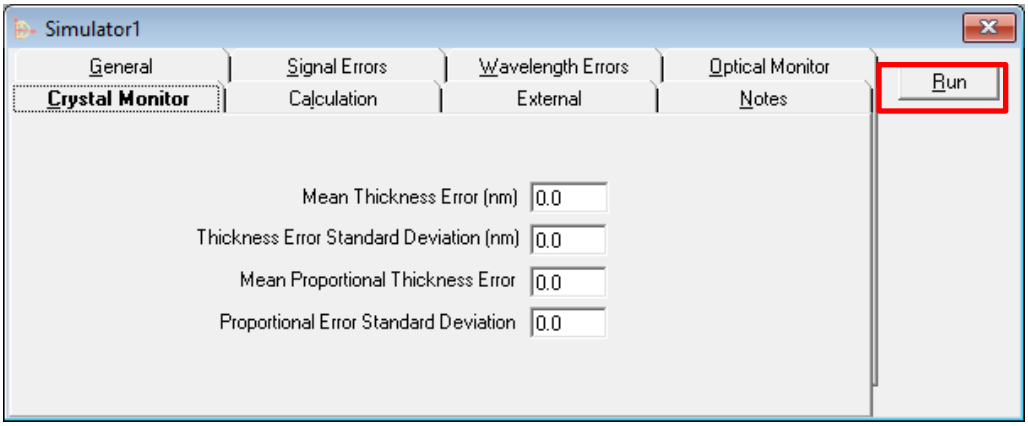


File > New > Simulator

File Upload는 해당 빈칸을 더블클릭하여 불러옴



Copyright ⓒ 디지크라식 http://www.thinfilm.co.kr



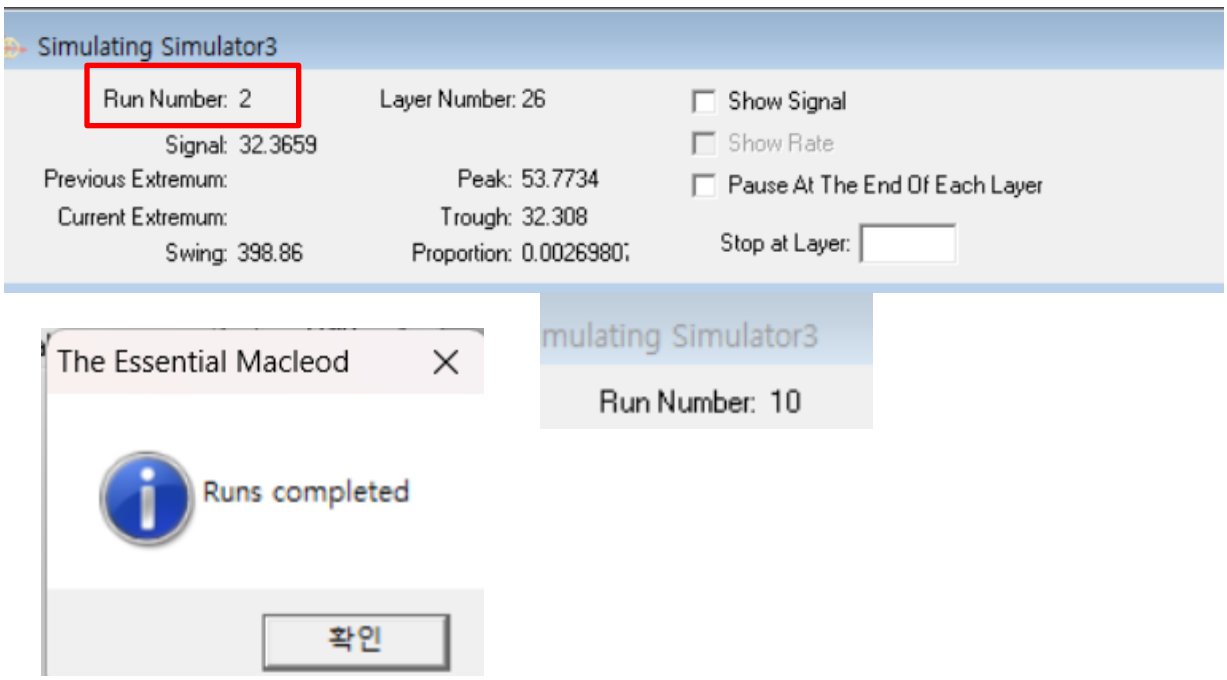
Calculation

- **Deposition Increment**

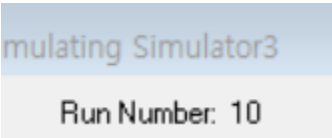
→ 증착을 얼마나 잘게 나누어 계산할지 결정

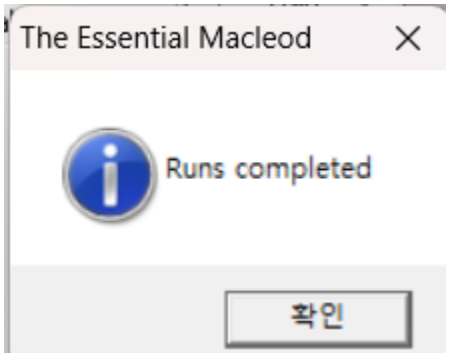
- 작을수록: 정확 ↑ / 속도 ↓
- 클수록: 정확 ↓ / 속도 ↑
- **0.01**: 표준·권장값
- **0.1**: 매우 복잡한 설계에서 시뮬레이션 가속용

Run

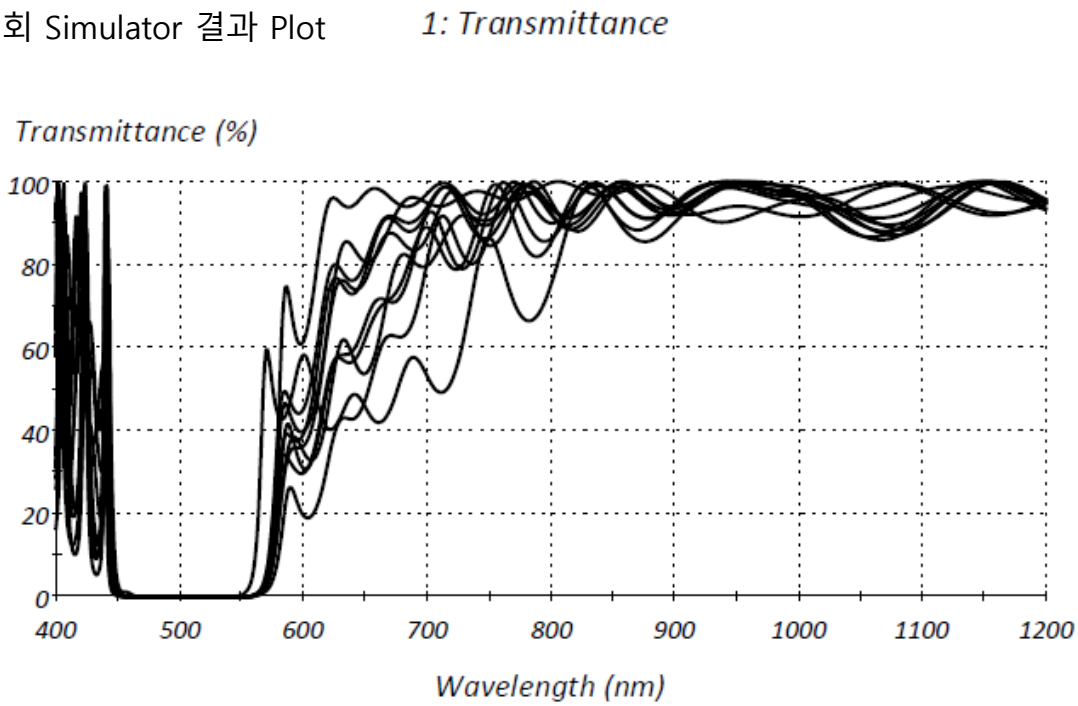


Copyright ⓒ 디지크라식
http://www.thinfilm.co.kr



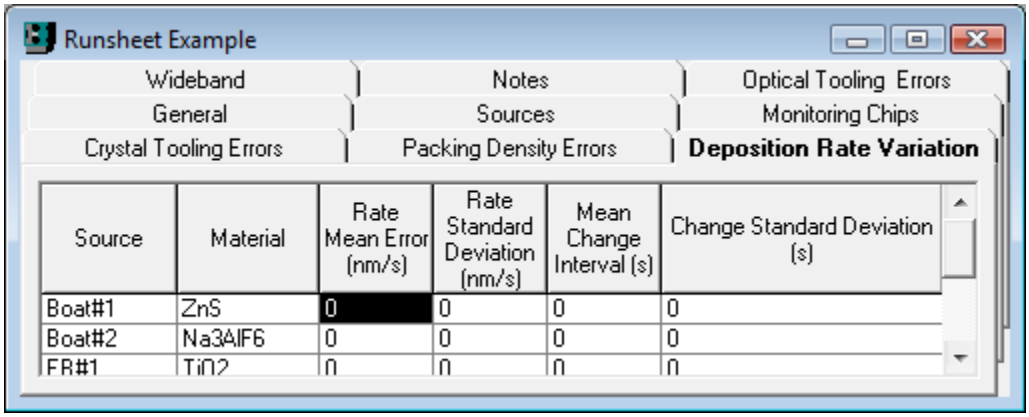


10회 Simulator 결과 Plot

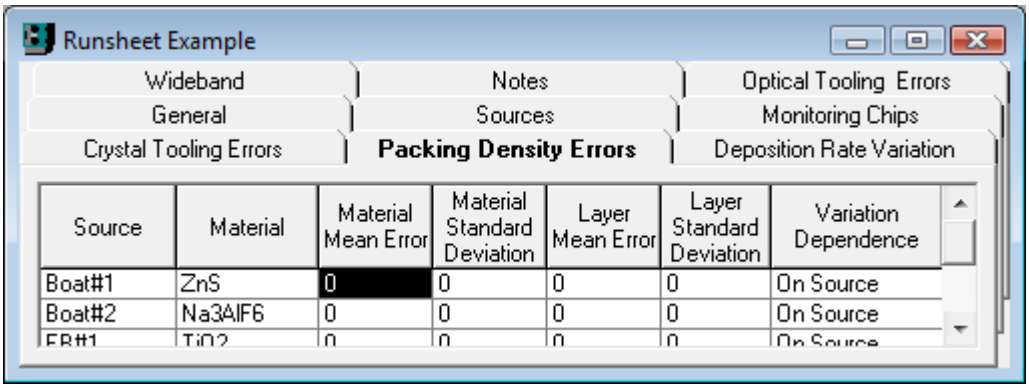


Copyright ⓒ 디지크라식
http://www.thinfilm.co.kr

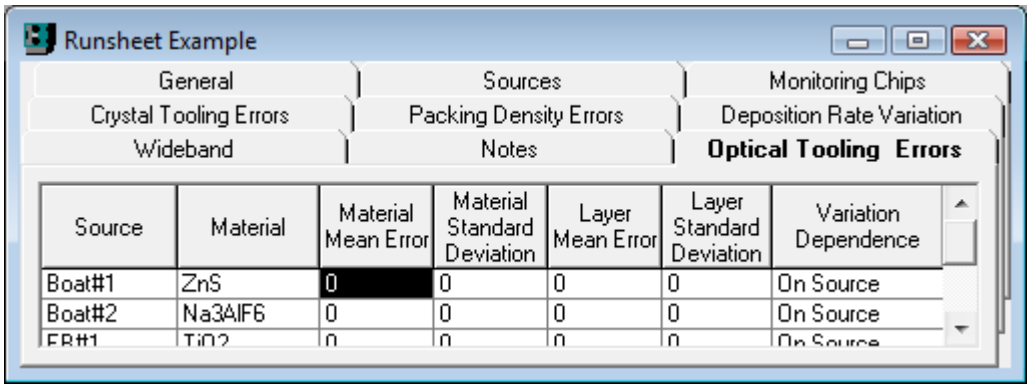
RunSheet > machine configuration.조정



Source	Material	Rate Mean Error (nm/s)	Rate Standard Deviation (nm/s)	Mean Change Interval (s)	Change Standard Deviation (s)
Boat#1	ZnS	0	0	0	0
Boat#2	Na3AlF6	0	0	0	0
EB#1	TiO2	0	0	0	0



Source	Material	Material Mean Error	Material Standard Deviation	Layer Mean Error	Layer Standard Deviation	Variation Dependence
Boat#1	ZnS	0	0	0	0	On Source
Boat#2	Na3AlF6	0	0	0	0	On Source
EB#1	TiO2	0	0	0	0	On Source



Source	Material	Material Mean Error	Material Standard Deviation	Layer Mean Error	Layer Standard Deviation	Variation Dependence
Boat#1	ZnS	0	0	0	0	On Source
Boat#2	Na3AlF6	0	0	0	0	On Source
EB#1	TiO2	0	0	0	0	On Source

Parameter 수정이 필요하면 설정 후 다시 "Run" 가능

Copyright ⓒ 디지크라식
http://www.thinfilm.co.kr