

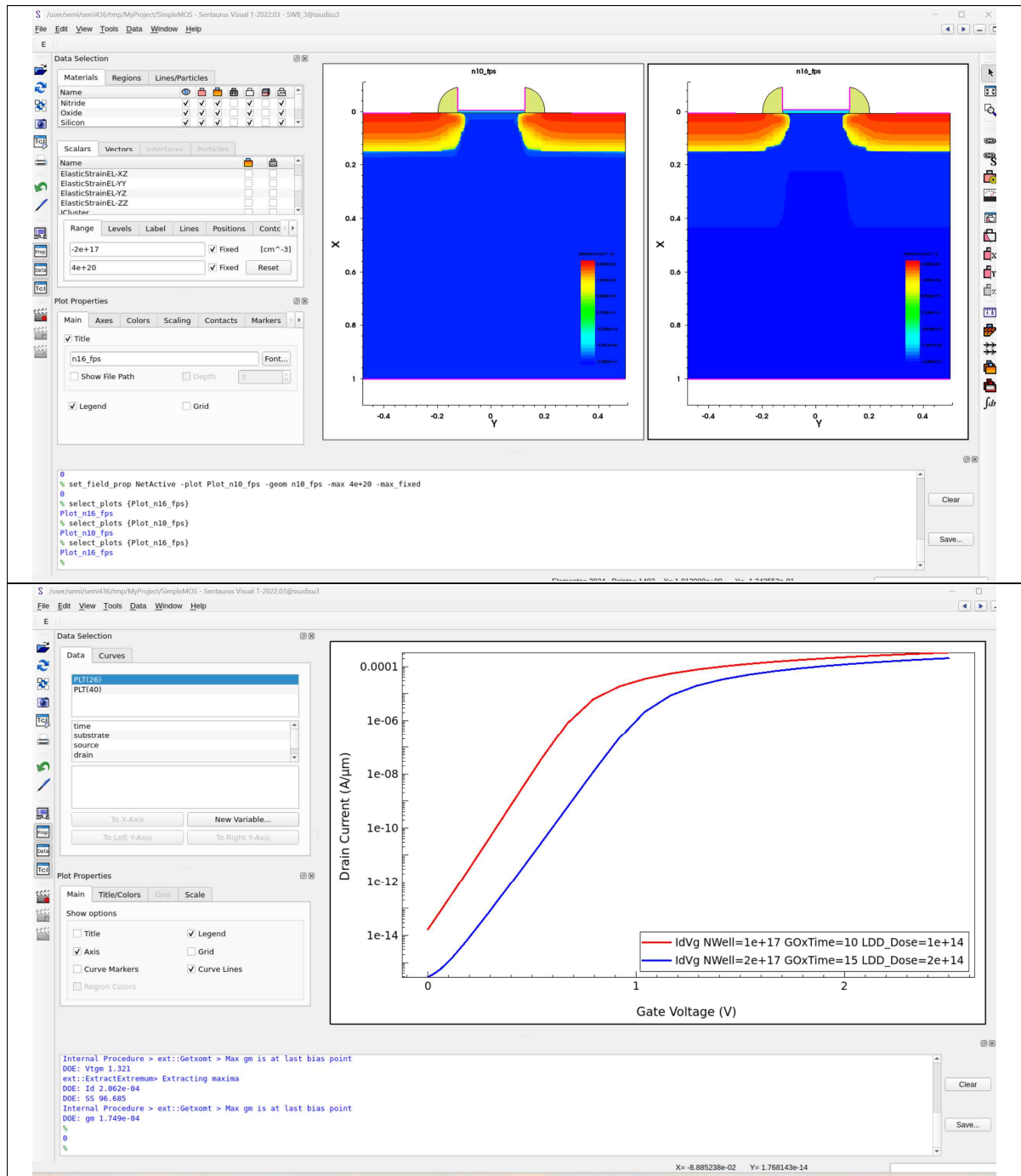
(TCAD)

P-type MOSFET 제작

반도체 집적공정 중간고사 대체과제

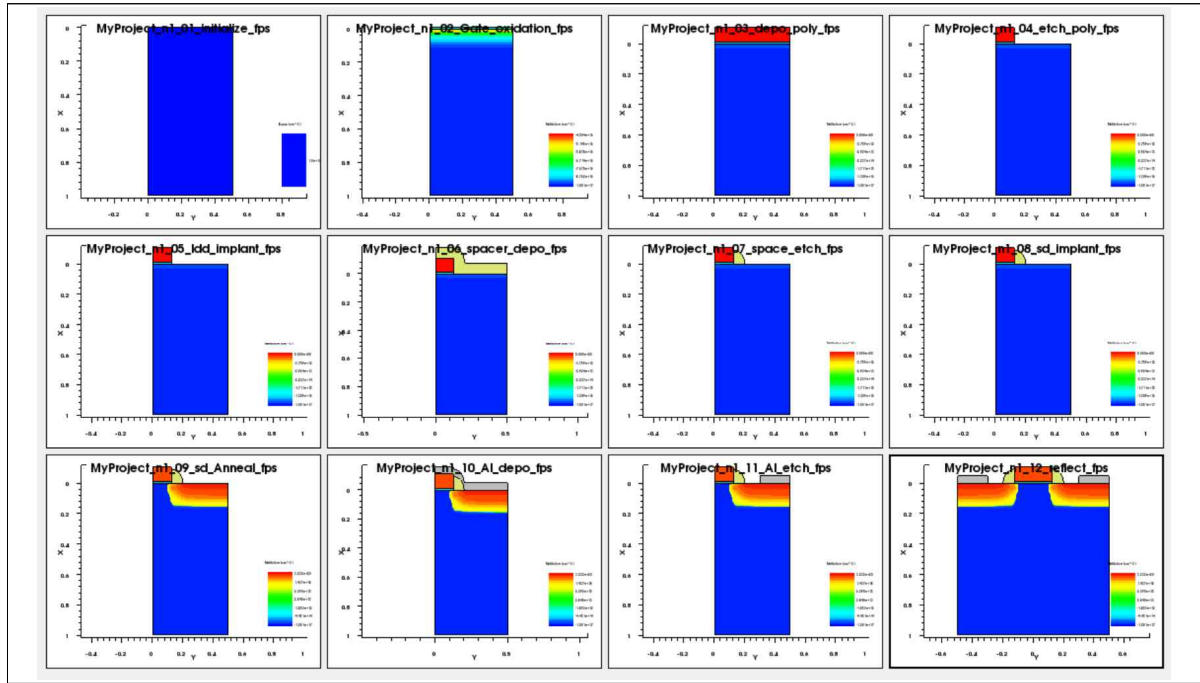
1. 5~7주차 수업 내 실습 내용

■ 5주차 실습 내용



- 기초적인 TCAD 활용법과 simpleMOS를 이용해 다양한 Data를 확인해보았다.
- 처음으로 사용한 기능은 소자 구조를 그려 각 세기를 확인하는 방법이다. 먼저 n10, n16 노드의 구조를 그린 후 Scalar 항목에서 “Net Active”를 선택하고, Range를 -2e+17에서 4e+20 으로 설정한 결과 사진이 첫 번째 사진이다.
- 그 다음 n42와 n56 노드를 선택하여 Graph를 Drawing 하였다. 두 개의 Graph(V-Drain Current) 그래프를 그려 확인하는 법을 학습하였다.

■ 6주차 실습 내용



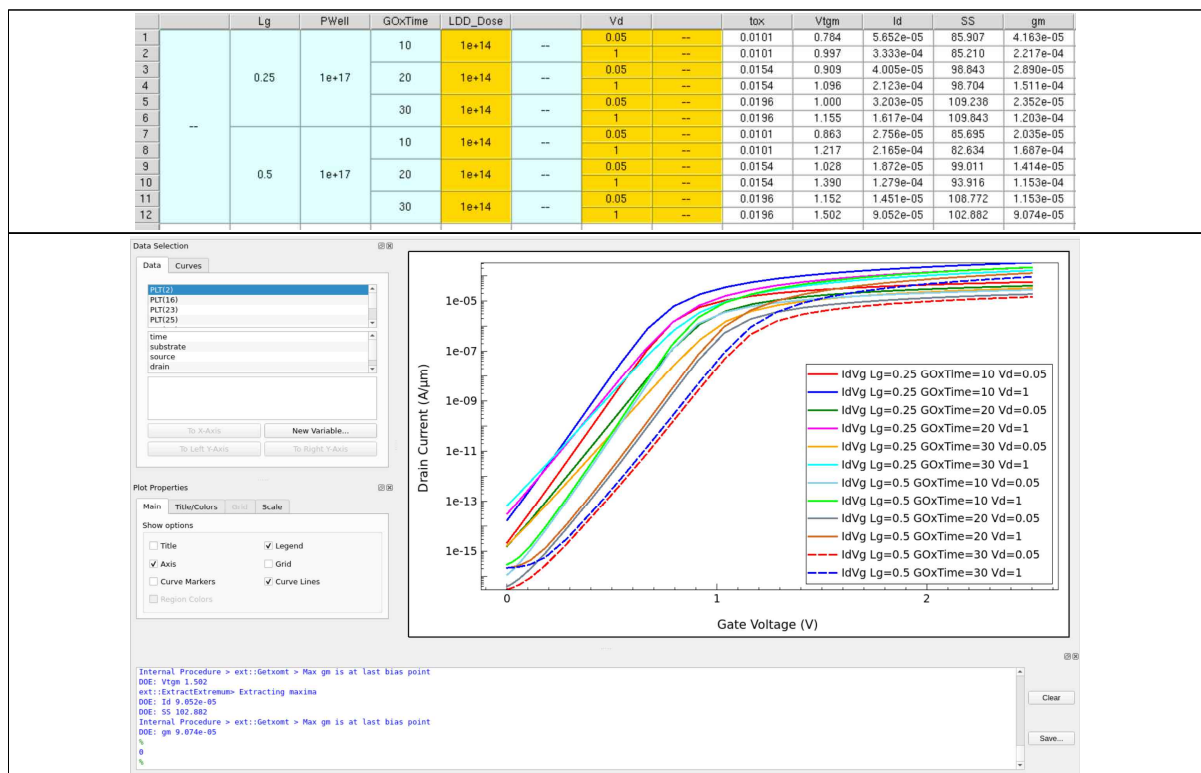
- SProcess 의 command code를 열어, 각 공정 단계마다 tdr 코드를 추가하였다. 예시는 다음과 같다.

```
struct tdr= My_Project_n@node@_10_Al_depo !Gas !interfaces
```

- @node@ 변수를 이름에 넣어줌으로써 해당 node 숫자가 바로 출력되도록 세팅 하였다.
Nwell IIP 직후, gate Ox, Poly Depo. Poly Etch, LDD IIP, Spacer Depo, Spacer Etch, S/D IIP, S/D Anneal, Al Depo. Al Etch, Reflect
- 변화하는 소자 구조를 해석하면 다음과 같다.

순번	공정 단계	구조 변화	소자 구조 해석
1	Pwell ion implantation 직후	Si 기판 위에 P-Well 도핑 형성된 초기구조	대부분이 파란색 Si 영역
2	Gate oxide 형성	Si 표면 위에 얇은 gate oxide 형성	기판 상단에 매우 얇은 색깔층(oxide) 형성
3	poly-Si 증착	Gate 전극으로 사용할 Poly-Si가 산화막 위에 증착	상단에 Poly 영역이 추가되어 빨강/노랑 계열의 층 생성
4	poly etch	증착된 Poly-Si 중 불필요한 부분 제거	특정 중앙 영역에만 빨강/노랑 층이 남은모습
5	LDD implant	Gate 양쪽에 얇은 저농도 LDD영역 형성	gate 양옆 표면 근처에 얇은 색 변화 발생

6	Spacer 물질 증착	Gate와 기판 표면 위에 Spacer 물질이 증착	Gate 주변을 감싸듯이 새로운 막이 덮임
7	Spacer Etch	Anisotropic etch로 수평면의 spacer 물질 제거	gate 양쪽 측면에만 spacer가 남아있는 모습
8	Source/Drain implant	Spacer 바깥쪽에 고농도 S/D 도핑이 주입	gate와 spacer 바깥쪽 표면 부근에 강한 색변화
9	Source/Drain Anneal	Implant된 dopant가 활성화	S/D도핑 영역이 이전보다 더 퍼진형태(색 분포)
10	Al 금속 증착	Al 금속층 증착(식각전)	소자 상부에 새로운 금속층이 덮여있음(회색)
11	Al Etch	불필요한 Al을 제거하여 전극패턴 형성	Al이 필요한 부분에만 남아있다.
12	Reflect	1~11 과정으로 만든 절반 구조를 대칭복사하여 MOSFET 구조 형성	이전 단계들과 달리 구조가 좌우로 확장되어 Source와 Drain이 대칭적으로 형성



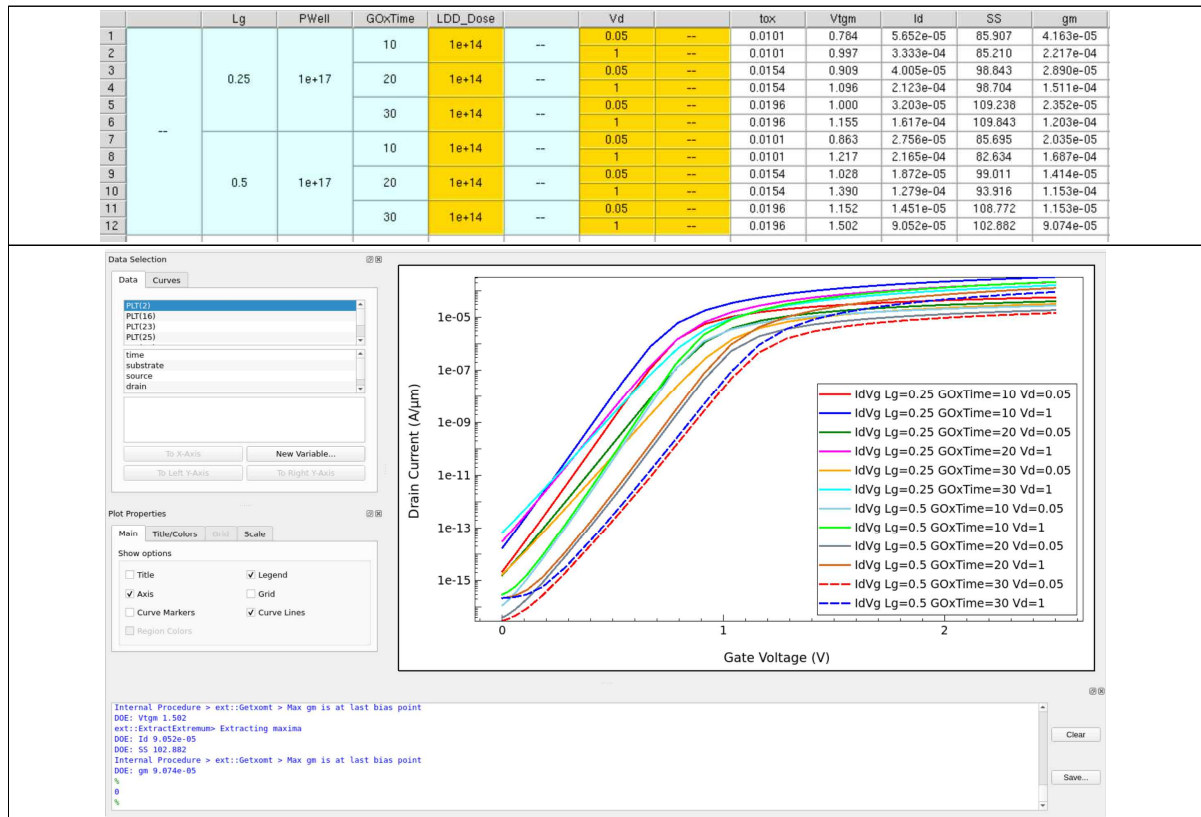
- Lg = 0.25, 0.5 로 split 한 후 transfer curve를 그려보았다. 또한 Lg parameter value 변화에

따른 V_{tgm} , I_d , SS , g_m 값 차이를 육안으로 확인할 수 있었다.

항목	Lg 증가 시 변화	해석
V_{tgm}	대체로 증가	채널 길이가 길어지면서 단채널 효과 감소 → 문턱전압(V_{tgm}) 높아짐
I_d	감소	채널 길이 증가에 따라 채널 저항이 커짐 → drain current 감소
SS	$V_d=1V$ 에서 감소 (즉, 개선)	긴 채널에서 gate 제어력이 상대적으로 안정 → subthreshold 특성 개선
g_m	감소	V_g 변화에 대한 I_d 변화량이 작아짐 → g_m 감소

- 해당 과정에서는 MOSFET 소자의 gate length(L_g) 변화가 transfer 특성에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 다른 공정 조건은 동일하게 유지하고, L_g 를 0.25에서 0.5로 증가시킨 뒤 V_{tgm} , I_d , SS , g_m 값을 비교하였다. 분석은 동일한 $G0 \times Time$ 및 동일한 drain voltage 조건에서 수행하였다.
- 먼저 V_{tgm} 의 경우, L_g 가 증가함에 따라 대부분의 조건에서 값이 증가하는 경향을 보였다. 특히 $V_d = 1\text{ V}$ 조건에서는 $G0 \times Time$ 에 관계없이 $L_g = 0.5$ 일 때 V_{tgm} 이 더 크게 나타났다. 이는 gate length가 길어지면서 drain 전계가 source 쪽 채널 형성에 미치는 영향이 감소하고, 단채널 효과가 완화되었기 때문으로 해석된다. 즉, 짧은 채널에서는 drain 전압에 의해 문턱전압이 낮아지는 효과가 상대적으로 크게 나타날 수 있지만, 긴 채널에서는 이러한 영향이 줄어들어 더 높은 gate voltage가 필요하게 된다.
- Drain current인 I_d 는 L_g 가 증가함에 따라 뚜렷하게 감소하였다. $V_d = 0.05\text{ V}$ 조건에서는 L_g 가 0.25에서 0.5로 증가할 때 I_d 가 약 51~55% 감소하였고, $V_d = 1\text{ V}$ 조건에서도 약 35~44% 감소하였다. 이는 채널 길이가 길어지면 전류가 이동하는 경로가 길어지고, 이에 따라 채널 저항이 증가하기 때문이다. 따라서 짧은 L_g 조건에서는 더 큰 drain current를 얻을 수 있으며, 구동 전류 측면에서는 $L_g = 0.25$ 조건이 더 유리하다.
- Subthreshold swing, 즉 SS 의 경우에는 조건에 따라 차이가 있었지만, $V_d = 1\text{ V}$ 조건에서는 L_g 가 증가할 때 SS 가 감소하는 경향이 나타났다. SS 값이 작을수록 gate voltage 변화에 따라 drain current가 더 급격하게 변한다는 의미이므로, 이는 subthreshold 영역에서의 스위칭 특성이 개선되었음을 의미한다. 따라서 긴 채널 조건은 구동 전류는 감소하지만, 문턱전압 안정성 및 subthreshold 특성 측면에서는 더 안정적인 결과를 보였다.
- Transconductance인 g_m 은 L_g 가 증가함에 따라 감소하였다. $V_d = 0.05\text{ V}$ 조건에서는 g_m 이 약 50% 감소하였고, $V_d = 1\text{ V}$ 조건에서는 약 25% 감소하였다. g_m 은 gate voltage 변화에 대한 drain current의 변화율을 나타내므로, L_g 가 짧을수록 gate 전압 변화에 대해 전류가 더 민감하게 반응한다. 따라서 $L_g = 0.25$ 조건은 더 높은 g_m 을 나타내며, 이는 빠른 스위칭 및 높은 구동 성능에 유리하다.

→ 종합적으로 볼 때, $L_g = 0.25$ 조건은 높은 I_d 와 g_m 을 확보할 수 있어 구동 전류와 성능 측면에서 유리하다. 반면 $L_g = 0.5$ 조건은 I_d 와 g_m 은 감소하지만, V_{tgm} 이 증가하고 일부 조건에서 SS 가 개선되어 단채널 효과 억제와 안정적인 동작 측면에서 장점을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 고성능 구동을 목표로 할 경우 짧은 gate length가 유리하지만, 안정적인 문턱전압과 subthreshold 특성을 고려할 경우 긴 gate length 조건도 의미가 있다.

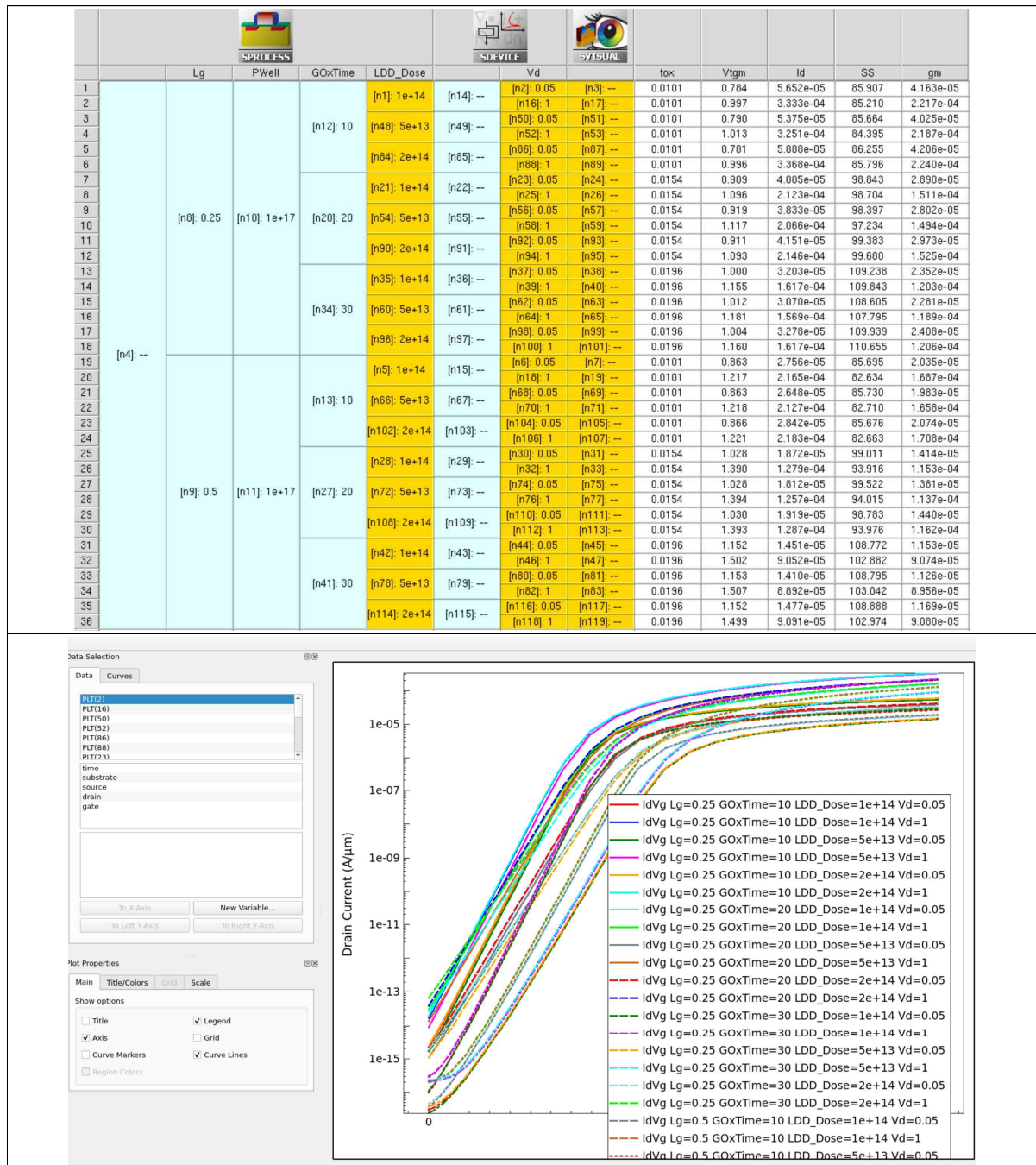


- 그 후 GOxTime 변수를 10, 20, 30으로 split 하여 변화를 확인하였다.

항목	GOxTime 증가 시 변화	해석
Tox	증가	산화시간 증가 → gate oxide 두꺼워짐
VTgm	증가	산화막 두꺼워짐 → 더 큰 gate 전압 필요
Id	감소	gate 제어력 약해짐 → Id 감소
SS	증가	스위칭이 둔해짐
gm	감소	Vg 변화에 따른 Id 변화량이 작아짐

- 이번에는 GOxTime 변수를 변화시켜 gate oxide 두께 변화가 MOSFET의 transfer 특성에 미치는 영향을 분석하였다. GOxTime이 10에서 20, 30으로 증가함에 따라 Tox는 약 0.0101에서 0.0154, 0.0196로 증가하였다. 이는 산화 시간이 길어질수록 gate oxide가 두꺼워졌음을 의미한다.
- GOxTime이 증가할수록 Vtgm은 전반적으로 증가하였다. 이는 gate oxide가 두꺼워지면서 gate 전압이 channel에 미치는 전기적 제어력이 약해지고, channel을 형성하기 위해 더 큰 gate voltage가 필요해졌기 때문이다. 따라서 transfer curve는 GOxTime 증가에 따라 오른쪽으로 이동하는 경향을 보인다.
- 반면 drain current인 Id는 GOxTime 증가에 따라 감소하였다. 산화막이 두꺼워지면 gate capacitance가 감소하고, 같은 gate voltage에서 형성되는 channel charge가 줄어들기 때문에 전류 구동 능력이 약해진다. 그 결과 gm 역시 함께 감소하였다. gm은 gate voltage 변화에 대한 drain current의 민감도를 의미하므로, GOxTime이 증가할수록 gate 제어력이 약해져 gm 값이 감소한 것으로 해석할 수 있다.
- SS는 GOxTime이 증가할수록 커지는 경향을 보였다. SS 값이 커진다는 것은 subthreshold 영역에서 전류가 더 완만하게 증가한다는 뜻이므로, 스위칭 특성이 악화되었다고 볼 수 있다.
- 그래프에서도 이러한 경향을 확인할 수 있다. GOxTime이 증가한 곡선일수록 전체적으로 오른쪽

으로 이동하고, 같은 gate voltage에서 Id가 더 낮게 나타난다. 즉, GOxTime이 짧은 조건은 높은 Id와 gm을 얻는 데 유리하고, GOxTime이 긴 조건은 산화막은 두꺼워지지만 gate 제어력과 전류 구동 특성은 저하되는 결과를 보인다.



- 마지막으로 LDD_Dose 값을 5e+13, 1e+14, 2e+14 로 Split 하였다.

항목	LDD_Dose 증가 시 변화	해석
Vtgm	큰 변화 없음 (일부 조건에서 소폭감소)	LDD는 Channel 자체보다 Source/Drain extension에 영향 → 변화 크지 않음
Id	증가	LDD 영역의 저항이 감소 → 전류 더 잘 흐름
SS	약간 증가 혹은 거의 유지	고농도 LDD에서 drain 전계 영향 커짐 → SS 소폭 악화 가능성

gm	증가	Id 증가 및 Series resistance 감소로 인해 gate 전압 변화에 대한 전류 반응 커짐
----	----	--

- 마지막으로 LDD_Dose 변화가 MOSFET의 transfer 특성에 미치는 영향을 분석하였다. LDD_Dose는 5e13, 1e14, 2e14 조건으로 변화시켰으며, 각 조건에서 Vtgm, Id, SS, gm 값을 비교하였다.
- 분석 결과, LDD_Dose가 증가할수록 drain current인 Id는 전반적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 LDD 영역의 도핑 농도가 증가하면서 source/drain extension 영역의 저항이 감소하고, channel에서 source/drain으로 전류가 더 쉽게 흐를 수 있기 때문이다. 따라서 높은 LDD_Dose 조건에서는 전류 구동 능력이 향상된다.
- gm 역시 LDD_Dose 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. gm은 gate voltage 변화에 대한 drain current의 변화율을 의미하므로, LDD 저항 감소로 인해 Id가 증가하면서 gm도 함께 증가한 것으로 해석할 수 있다. 따라서 고속 동작이나 높은 구동 전류가 필요한 경우에는 높은 LDD_Dose가 유리할 수 있다.
- 반면 Vtgm은 LDD_Dose 변화에 대해 큰 변화를 보이지 않았다. 이는 LDD 공정이 channel 중앙부의 도핑보다는 gate 양쪽의 extension 영역에 영향을 주는 공정이기 때문이다. 따라서 문턱전압은 LDD_Dose보다 gate oxide 두께, channel length, well doping 등의 영향을 더 크게 받는다고 볼 수 있다.
- SS의 경우에는 LDD_Dose가 증가할수록 일부 조건에서 약간 증가하는 경향이 나타났다. SS 값이 증가한다는 것은 subthreshold 영역에서 스위칭 특성이 둔해지는 것을 의미한다. 특히 짧은 Lg 조건에서는 높은 LDD_Dose가 drain 전계 영향을 증가시켜 off-state leakage 또는 subthreshold 특성 악화를 유발할 수 있다.
- 그래프에서도 LDD_Dose에 따른 곡선 차이는 Lg나 GOxTime 변화에 비해 크지 않다. 같은 Lg, GOxTime 조건 안에서는 LDD_Dose가 큰 곡선이 약간 위쪽에 위치하며, 이는 같은 gate voltage에서 더 큰 Id가 흐른다는 것을 의미한다. 다만 곡선 간 차이가 크지 않으므로, LDD_Dose는 전체 transfer curve의 위치를 크게 바꾸기보다는 전류 구동 능력과 gm을 세부적으로 조정하는 변수로 볼 수 있다.

■ 7주차 실습 내용

(1) 하기의 Ref. 조건 대비 Id, SS, Ioff가 가장 개선된 조건 확보

Lg	Nwell	GOxTime	LDD_Dose	Vd	Tox	Vtgm	Id	SS	gm
0.25	1e+17	10	1e+14	0.05 V	0.0101	0.764	5.65E-05	85.907	4.16E-05
				1 V	0.0101	0.997	3.33E-04	85.21	2.22E-04

[Ref. 조건]

	Lg	PWell	iOxTIm	LDD_Dose	SD_Dose	Vd	Vg	tox	Vtgm	Id	SS	gm	Vg0_actual	Ioff0	Vg005_actual	Ioff005			
1	--	0.25	1e+17	10	4.2e+13	2.5e+15	--	0.05	2.5	--	0.0101	0.780	5.702e-05	85.306	4.070e-05	0	2.000423637e-15	0.0442066666667	6.18081309986e-15
2						1	2.5	--	0.0101	0.998	3.335e-04	84.305	2.221e-04	0	1.53048125164e-14	0.0442066666667	4.849914457e-14		
Vg0_actual		Ioff0				Vg005_actual				Ioff005									
0		2.000423637e-15				0.0442066666667				6.18081309986e-15									
0		1.53048125164e-14				0.0442066666667				4.849914457e-14									
Lg	PWell	G0xTime	LDD_Dose	SD_Dose	Vd	Vtgm	Id	SS	gm	Ioff(Vg=0)									
0.25	1e+17	10	4.2e+13	2.5e+15	0.05	0.780	5.702e-5	85.306	4.070e-5	2.0e-15									
					1.0	0.998	3.335e-4	84.305	2.221e-4	1.5e-14									

[최적화 조건]

- 최적화에 대한 기준은 SS와 Id, Ioff가 적절한 어느 하나만 발전하는 것이 아닌, 적절한 조화를 이루는 것으로 정의했다. SS란 gate 전압을 얼마나 올려야 전류가 10배 증가하는 지를 나타내는 지표이다. 따라서 작을수록 섬세한 소자임을 의미한다. Id 값은 트랜지스터 작동 시에 실제로 열

마나 많은 전류를 흘려줄 수 있는가를 나타내는 지표이다. 클수록 강한 소자임을 의미한다. 마지막으로 Ioff 란, 트랜지스터가 off 상태일 때, 누설되는 전류의 값을 나타낸다. 낮은 값일수록 전류 낭비가 적다는 것을 의미한다. 해당 과정에서는 Vg가 0일때와 0.05 일때의 Ioff 값을 둘 다 표시하여 수치를 비교했다.

- 결론적으로 SS는 작게, Id는 크게, Ioff는 작게 만들되 어느 하나만 좋아지는 것이 아닌 균형을 이룰 수 있도록 제작하는 것을 목표로 하였다. (최적화)

- 최적의 값을 찾아가는 과정을 요약하면 다음과 같다.

① SD_Dose 값을 1e+15, 2e+15로 Split 한 data를 분석했을 때(다음과제(2) graph 참고), SS는 변화가 거의 없고, Id 는 조금 증가, Vtgm은 조금 낮아지는 것을 확인했다. 이를 통해 SD_Dose 가 전기적제어(SS) 보다는 직렬저항 및 전류 구동 쪽에 더 영향을 줌을 확인했고, 결정적으로 SD_Dose를 2e+15 로 잡고 다른 parameter들을 Split 하였다.

② PWell을 1e+17, 5e+16, 3e+17, 1e+18, 8e+16, 1.2e+17 값으로 Split 하였다. PWell의 도핑농도를 10승씩, 그리고 작은 범위로 흔들어보면서 효율이 좋은 PWell 폭을 찾는 과정을 거쳤다. 최종적으로 1e+17은 확인하려는 모든 값들이 안정적임을 확인했고, 8e+16은 전체적인 균형이 좋으며 1.2e+17은 Id는 조금 낮아지지만 Ioff 쪽의 효율이 좋아져 해당 3 value를 가지고 다음 과정으로 넘어갔다.

③ LDD_Dose 값을 5e+13, 7e+13, 1e+14, 1.3e+14 값으로 Split 해보았다. LDD_Dose 값이 너무 낮아지면 extension의 저항이 커져 Id가 감소한다. 그러나 너무 높은 경우 LDD의 완충작용 효율이 낮아져 drain 쪽 전기장이 세져 SS와 Ioff 가 악화될 확률이높다. 이렇게 Split 하여 run 했을 때, (PWell/LDD_Dose, 이유) (8e+16/5e+13, Id 높고 SS도 높으며 가장 균형 좋음), (1e+17/7e+13, Id 손실 있으나 수치가 적고 SS는 개선됨), (1e+17/5e+13, SS는 훨씬 좋지만 Id가 감소) 의 조합이 가장 효율이 좋았다.

④ 그렇게 최종 후보를 (8e+16/4e+13), (8e+16/5e+13), (1e+17/4e+13), (1e+17/5e+13) 로 줄인 후, Ioff 값을 확인하였다. Ioff 값은 Vd=1에서 각 노드별 그래프를 그린 후, x=0.05 지점을 찍어서 값을 확인해야 하지만, SVisual Command 코드에서 아래의 구문을 추가하여, Workbench에 Vg=0에서의 Ioff 값과 Vg=0.05에서의 Ioff 값을 표현할 수 있도록 하여 수치로 판단하였다. 또한, 찍힌 x값(Vg의 값) 의 지점이 정확히 0.05 지점이 아닐 확률이 높기 때문에, 정확도를 눈으로 확인하기 위해 어느 x지점이 찍혔는지도 함께 표시되도록 하였고, 대부분 Vg=0.442 지점에서 Ioff 값이 나온 것을 확인할 수 있었다.

⑤ 이후 값들을 비교하여 미세조정을 실시하였다. LDD_Dose에서 1.3e+14 빼고, 4e+13, 6e+13, 8e+13 추가하였고, 이후 SD_Dose 미세조정을 위해 2.5e+15, 3e+15 값을 추가하였다. 최종적으로 위 사진에서 보이는 1e+17/4.2e+13/2.5e+15를 선택하였다.

```
# ---- Ioff extraction: nearest point to Vg = 0.0 and 0.05 ----
set best_dx0 1e30
set best_i0 0
set best_dx005 1e30
set best_i005 0
for {set i 0} {$i < [llength $Vgs]} {incr i} {
    set vx [lindex $Vgs $i]
    set dx0 [expr {abs($vx - 0.0)}]
    if {$dx0 < $best_dx0} {
        set best_dx0 $dx0
        set best_i0 $i
    }
}
```

```

set dx005 [expr {abs($vx - 0.05)}]
if {$dx005 < $best_dx005} {
    set best_dx005 $dx005
    set best_i005 $i
}
}
set Vg0_actual [lindex $Vgs $best_i0]
set Ioff0 [lindex $Ids $best_i0]
set Vg005_actual [lindex $Vgs $best_i005]
set Ioff005 [lindex $Ids $best_i005]
puts "DOE: Vg0_actual $Vg0_actual"
puts "DOE: Ioff0 $Ioff0"
puts "DOE: Vg005_actual $Vg005_actual"
puts "DOE: Ioff005 $Ioff005"
}

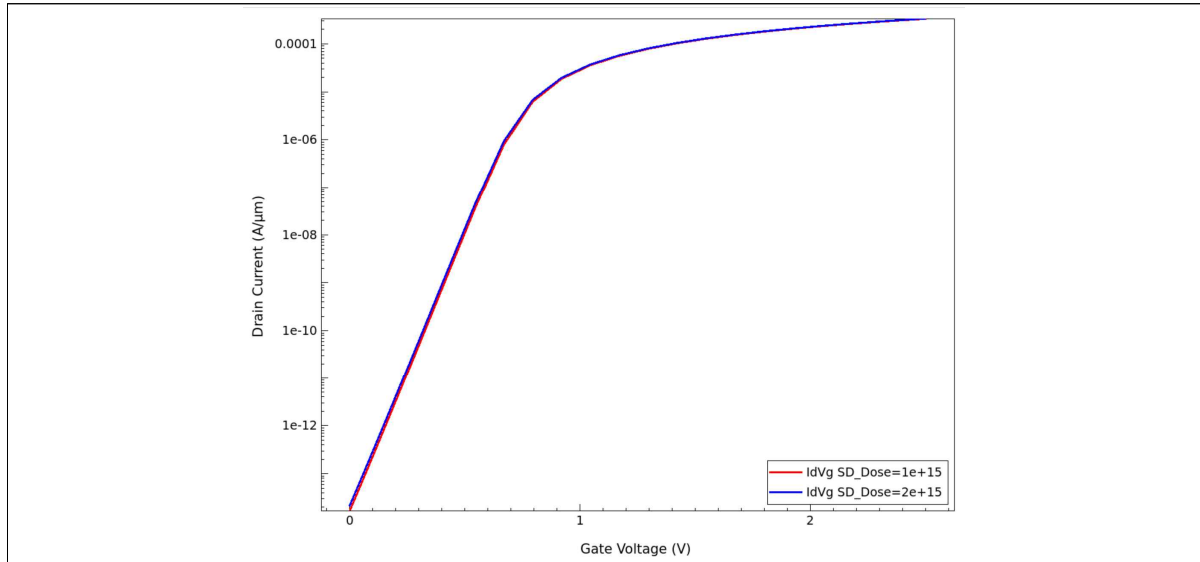
```

- Ref. 조건과 비교하여 직접 최적화한 트랜지스터는 다음과 같은 향상을 보였다. 예시에서는 Ioff 값이 나와있지 않기에, Ioff0을 기준으로 값을 추정하여 비교하였다. [$I_{off} \propto 10^{-\frac{V_{tgm}}{SS}}$ 사용]

Vd = 0.05 V 기준			
항목	Ref. 조건	최적화 결과	개선 정도
Id	5.65e-05	5.702e-05	약 0.92% 증가
SS	85.907	85.306	약 0.70% 감소
gm	4.16e-05	4.070e-05	약 2.16% 감소
Ioff0	(추정) 3.53e-15	2.00e-15	약 43% 감소
Vd = 1.00 V 기준			
항목	Ref. 조건	최적화 결과	개선 정도
Id	3.33e-04	3.335e-04	거의 동일
SS	85.21	84.305	약 1.06% 감소
gm	2.22e-04	2.221e-04	거의 동일
Ioff0	(추정) 2.10e-14	1.53e-14	약 27% 감소

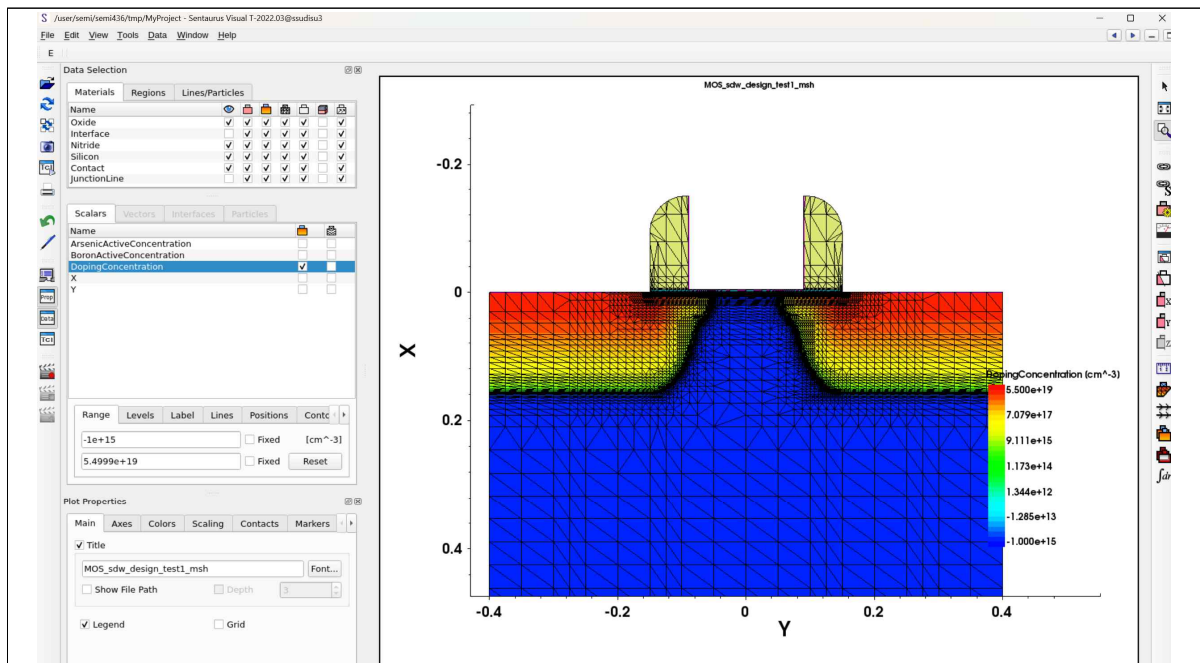
- 해당값을 통해, Vtgm 값은 소폭 증가하였으나, 처음 목표로 했던 SS, Id, Ioff 의 최적 조건을 맞추는데에는 성공했다. 특히 전반적으로 Ioff 값 효율을 증가시키는데에 중점을 뒀으며 해당 트랜지스터는 전체적인 성능이 향상되면서도 어느 하나의 균형이 깨지지 않도록 가장 최적화 된 트랜지스터이다.

(2) S/D Dose를 $1e+15$, $2e+15$ 로 split 한 뒤 $V_d=1V$ 에서 Transfer curve 그리기



- S/D Dose = $2e+15$ (파란색) 이 $1e+15$ (빨간색) 보다 전체적으로 약간 위에 위치해서, 같은 V_g 에서 I_d 가 조금 더 크게 나타난다.
- 이는 S/D 도핑 농도가 증가하면서 source/drain 저항이 감소해 전류가 더 잘 흐르기 때문으로 해석할 수 있다.
- 다만 두 곡선이 거의 겹치므로, S/D Dose $1e+15 \rightarrow 2e+15$ 변화는 I_d 를 소폭 개선하나 V_{tgm} , SS 등 transfer curve 전체 형태에는 큰 영향을 주지 않는 변수로 볼 수 있다.

(3) S-Device Editor를 사용해서 연습 후 MOS 구조 제출



2. 기존 SimpleMOS 대비 P-type MOSFET 구현을 위해 변경한 공정 및 그 이유

- 일반적인 nMOS는 p-type well 또는 p-type substrate 위에 n+ source/drain을 형성하여 전자를 주된 carrier로 사용한다. 반면 pMOS는 n-type well 위에 p+ source/drain을 형성하고, hole을 주된 carrier로 사용한다. 따라서 pMOS 구현을 위해서는 단순히 전압 조건만 바꾸는 것이 아니라, well 형성 공정과 source/drain 및 LDD implant 공정에서 사용하는 dopant 종류를 반대로 조정해야 한다. 따라서 변경한 공정은 다음과 같다.

구분	SimpleMOS(nMOS)	pMOS	변경 이유
Well 형성	P-type well	N-type well	pMOS는 p+ source/drain이 n-type body 위에 형성되어야 하므로, channel/body 영역을 n-type으로 구성해야 함
Channel type	p-type body에서 전자 channel 형성	n-type body에서 정공 channel 형성	pMOS는 음의 gate 전압에 의해 hole inversion channel이 형성되는 소자이기 때문
LDD Implant	n type dopant 사용 (Phosphorus/Arsenic)	p-type dopant 사용 (Boron/BF ₂)	pMOS의 source/drain extension 영역은 p-type이어야 하므로 LDD 도핑 극성을 변경해야 함
Source/Drain Implant	n+ S/D 형성	p+ S/D 형성	pMOS에서는 hole이 source에서 drain으로 이동하므로 source/drain을 p+ 영역으로 형성해야 함
Dopant 종류	donor 계열 사용	acceptor 계열 사용	pMOS는 hole을 공급하는 acceptor dopant가 필요함
Gate 전압조건	양수 gate voltage에서 ON	음수 gate voltage에서 ON	pMOS는 gate에 음전압을 인가해야 n-well 표면에 hole channel이 형성됨
Drain 전압 조건	양의 drain voltage	음의 drain voltage	pMOS는 nMOS와 반대 극성으로 동작하므로 전압 sweep 방향도 반대로 설정해야 함
전류 해석	electron current 중심	정공 current 중심	carrier 종류가 정공으로 바뀌기 때문에 전류 방향과 부호 해석이 달라짐

- nMOS 는 p형 기판위에 n형 LDD 및 n형 S/D를 형성하고 게이트 전압을 양전압으로 인가한다. 그러나 pMOS로 변경하면서 웨이퍼 도핑종류, 이온 주입종, 소자 구동 전압의 방향을 수정해야한다. 따라서 pWell을 nWell로 변경하고, LDD와 S/D를 p형 도핑 소자로 변경한 후 게이트 전압을 음전압으로 구동하는 것이 큰 목표이다. 이를 위해 코드를 재구성하여 다음과 같은 과정을 진행하였다.
- 먼저 SProcess에서 변경한 구문들은 다음과 같다.

① 기본 웨이퍼 도핑 변경

```
init concentration= @PWell@ field= Boron
```

으로 되어있던 구문을

```
init concentration= @NWell@ field= Phosphorus
```

로 변경하였다. 바디 영역이 n형이어야하고, S/D가 정공(hole)을 운반자로 하는 p형 도핑 반도체여야하기 때문에 도핑 종류를 Boron 에서 Phosphorus 로 변경하는 과정이다.

② LDD 이온 주입 변경

```
implant Arsenic dose=@LDD_Dose@ energy=30
```

으로 되어있던 구문을

```
implant BF2 dose=@LDD_Dose@ energy=@LDD_E@
```

로 변경하였다. 도핑 물질을 Arsenic에서 BF2로 변경하였다. 이때, 채널링 억제와 같은 에너지에서 더 얇은 접합 형성에 유리하도록 Boron 보다 무거운 BF2를 사용하였다. 주로 pMOS의 얇은 p형 S/D 와 LDD 형성에 BF2가 자주 사용된다. 또한 30으로 고정되어있던 에너지 값을 자유롭게 변경하기 위해 변수 parameter @LDD_E@ 으로 변경하였다.

③ S/D 임플란트 변경

```
implant Phosphorus dose=1e+15 energy=15
```

으로 되어있던 구문을

```
implant BF2 dose=@SD_Dose@ energy=@SD_E@
```

로 변경하였다. p형 S/D 가 필요하기때문에, 물질을 Phosphorus에서 BF2로 변경하고, energy 값을 @SD_E@ 변수로 분리함으로써 접합 깊이와 직렬저항, 누설 전류등의 특성을 함께 최적화 할 수 있도록 하였다.

④ 열처리 공정 변수 추가(RTA)

```
diffuse time=1<s> temperature=1000
```

초기 SimpleMOS 에서는 열처리 접합 확산 시간의 값이 상수 값(1<s>) 이었으나, RTA 값을 변경해가며 추출값을 확인하기 위해 RTA 값을 다음과 같이 @RTA@ 변수로 분리하였다.

```
diffuse time=@RTA@<s> temperature=1000
```

RTA 시간이 길어질수록, 도펀트의 활성화는 증가하고 접합이 과도하게 확산되어 leakage나 short-channel effect에 불리할 수 있다.

⑤ 또한 이후 각각의 공정구조를 확인하기 위해 다음 과정들에 tdr 코드를 추가하였다.

번호	TDR 코드 이름	공정 단계
1	`PMOS_n@node@_01_wafer_init`	웨이퍼 생성 / NWell 형성 후
2	`PMOS_n@node@_02_gate_oxide`	게이트 산화 후
3	`PMOS_n@node@_03_poly_deposit`	Poly 증착 후
4	`PMOS_n@node@_04_gate_pattern`	Poly/oxide 식각 후, 게이트 패터닝 완료
5	`PMOS_n@node@_05_LDD_implant`	LDD 임플란트 후

6	`PMOS_n@node@_06_spacer_deposit`	스페이서용 질화막 증착 후
7	`PMOS_n@node@_07_spacer_etch`	스페이서 형성 완료 후
8	`PMOS_n@node@_08_SD_implant`	Source/Drain 임플란트 후
9	`PMOS_n@node@_09_anneal`	RTA(anneal) 후
10	`PMOS_n@node@_10_Al_deposit`	Al 금속 증착 후
11	`PMOS_n@node@_11_Al_etch`	Al 식각 후
12	`PMOS_n@node@_12_reflect`	Reflect 후, 대칭 구조 완성
13	`PMOS_n@node@_13_final_device`	contact 정의 후 최종 소자 완료

- 다음으로 SDevice command 코드에서 변경한 내용이다.

① 전압 방향 수정

```
Goal { Name="gate" Voltage=2.5 }
```

nMOS에서는 양전압 방향으로 gate sweep이 이루어져있다. Vg값은 0~2.5, Vd값은 -0.05~-1.00으로 수정해야한다. 따라서 코드 구문상으로는 해당 parameter 들을 변수로 설정 한 뒤, workbench에서 parameter 값을 Vd=-0.05, -1.0 그리고 Vg = -2.5 로 설정하여 진행하였다.

```
Goal { Name="drain" Voltage=@Vd@ }
```

```
Goal { Name="gate" Voltage=@Vg@ }
```

또한 추가적으로 저전압 구간에서 graph 해상도를 위해 sweep step을 더 촘촘한 값으로 조정하였다. (InitialStep, Increment, MaxStep) 값 수정을 함으로써 Ioff를 더 쉽고 정확하게 읽을 수 있도록 하였다.

- 다음으로 SVisual command 구문을 변경하였다.

① pMOS는 결과가 음수 방향으로 나타날 수 있다. 따라서 이 값을 수치상으로 편하게 확인하기 위해 절대값을 붙여 나타나도록 하려고한다. 이를 위해서

```
set Vgs [get_variable_data "gate OuterVoltage" -dataset PLT($n)]
```

```
set Ids [get_variable_data "drain TotalCurrent" -dataset PLT($n)]
```

```
ext::ExtractVtgm -out Vtgm -name Vtgm -v $Vgs -i $Ids
```

```
ext::ExtractExtremum -out Id -name Id -x $Vgs -y $Ids -type max
```

```
ext::ExtractSS -out SS -name SS -v $Vgs -i $Ids -vo [expr {$Vtgm/3.0}]
```

```
ext::ExtractGm -out gm -name gm -v $Vgs -i $Ids
```

형식으로 작성되어 있던 코드를 다음과 같이 변경하였다. nMOS의 경우 drain current를 그대로 읽어서 사용해도 바로바로 판단하는데에 문제가 없으나, pMOS는 방향이 반대여서 음수값으로 나오기에 단순히 육안으로 수치를 크기만 구분하기 편하도록 절대값 parameter로 재구성하였다.

```
set Vgs [get_variable_data "gate OuterVoltage" -dataset PLT($n)]
```

```
set IdsRaw [get_variable_data "drain TotalCurrent" -dataset PLT($n)]
```

```
# For PMOS, use absolute current values
```

```
set Ids {}
```

```
foreach i $IdsRaw {
```

```
    lappend Ids [expr {abs($i)}] ← 절대값으로 제작
```

```
}
```

```
ext::ExtractVtgm -out Vtgm -name Vtgm -v $Vgs -i $Ids
```

```

ext::ExtractExtremum -out Id -name Id -x $Vgs -y $Ids -type max
ext::ExtractSS -out SS -name SS -v $Vgs -i $Ids -vo [expr {$Vtgm/3.0}]
ext::ExtractGm -out gm -name gm -v $Vgs -i $Ids

```

② 그 후 I_{off} , I_{min} ($V_g \approx 0V$ 에서의 off current) 와 I_{on} , I_{max} ($V_g \approx -2.5V$ 에서의 on current) 그리고 V_{g0_actual} , V_{gIon_actual} (실제로 해당 전류를 얻은 gate voltage 값)이 workbench에 나올 수 있도록 코드에 추가하였다. 아래는 각 구문에 대한 설명을 포함한 내용이다. 먼저 각 값들을 계산하여 추출하는 구문을 작성한뒤,

```

# [유지] 문턱전압 추출
# PMOS에서도 threshold 특성을 보기 위해 유지
ext::ExtractVtgm -out Vtgm -name Vtgm -v $Vgs -i $Ids

# [유지] 최대 전류 추출
# 전체 sweep 구간에서 가장 큰 |Id|를 확인
ext::ExtractExtremum -out Id -name Id -x $Vgs -y $Ids -type max

# [유지] Subthreshold Swing 추출
# 스위칭 특성 평가를 위해 유지
ext::ExtractSS -out SS -name SS -v $Vgs -i $Ids -vo [expr {$Vtgm/3.0}]

# [유지] Transconductance 추출
# 게이트 제어 능력 평가를 위해 유지
ext::ExtractGm -out gm -name gm -v $Vgs -i $Ids

# [추가] 전체 데이터 포인트 수 확인
# 이후 특정 gate voltage에 가장 가까운 점을 찾기 위해 사용
set npts [llength $Vgs]

# [추가]  $V_g = 0V$  근처 점 탐색용 초기값
# →  $I_{off}$ ,  $I_{min}$  추출 목적
set best_i0 0
set best_d0 1e30

# [추가]  $V_g = @V_g@$  근처 점 탐색용 초기값
# →  $I_{on}$ ,  $I_{max}$  추출 목적 (보통  $V_g = -2.5V$ )
set best_ion 0
set best_dlon 1e30

# [추가] 전체  $V_g$  리스트를 순회하며
#  $0V$ 에 가장 가까운 점과  $-2.5V$ 에 가장 가까운 점을 찾음
for {set i 0} {$i < $npts} {incr i} {
    set vg [lindex $Vgs $i]

    #  $V_g = 0V$ 와의 거리 계산
    set d0 [expr {abs($vg - 0.0)}]

```

```

if {$d0 < $best_d0} {
    set best_d0 $d0
    set best_i0 $i
}

# Vg = 목표 on-voltage(@Vg@)와의 거리 계산
set dlon [expr {abs($vg - @Vg@)}]
if {$dlon < $best_dlon} {
    set best_dlon $dlon
    set best_ilon $i
}
}

# [추가] Vg = 0V 근처 값 저장
# → Ioff, Imin 평가용
set Vg0_actual [lindex $Vgs $best_i0]
set Ioff [lindex $Ids $best_i0]
set Imin [lindex $Ids $best_i0]

# [추가] Vg = -2.5V 근처 값 저장
# → Ion, Imax 평가용
set VgIon_actual [lindex $Vgs $best_ilon]
set Ion [lindex $Ids $best_ilon]
set Imax [lindex $Ids $best_ilon]

```

마지막으로 위 구문으로 추출한 값들을 Workbench 에 나타내기 위해 다음 구문을 추가하였다.

```

# [추가] Vg = 0V 근처의 실제 읽은 gate voltage 값 출력
# → Ioff가 정말 0V 근처에서 읽힌 값인지 검증용
puts "DOE: Vg0_actual [format %.4f $Vg0_actual]"

# [추가] Vg = 0V 근처 off current 출력
# → Ioff, Imin 육안 확인용
puts "DOE: Ioff [format %.3e $Ioff]"
puts "DOE: Imin [format %.3e $Imin]"

# [추가] Vg = -2.5V 근처의 실제 읽은 gate voltage 값 출력
# → Ion이 목표 on-voltage 근처에서 읽힌 값인지 검증용
puts "DOE: VgIon_actual [format %.4f $VgIon_actual]"

# [추가] Vg = -2.5V 근처 on current 출력
# → Ion, Imax 육안 확인용
puts "DOE: Ion [format %.3e $Ion]"
puts "DOE: Imax [format %.3e $Imax]"

```

3. 주요 공정 후 구조 변화를 시각화

- 앞서 설명한 tdr 코드를 넣은 각 공정을 시각화하였다. 총 13개 과정으로 나누어 확인했으며 최적화가 완료된 pMOS 에 대한 소자 구조이다. (최적화 과정 및 결과는 아래 5.에서 설명) 확인 한 공정 단계는 다음과 같다.(위 표 재확인)

번호	TDR 코드 이름	공정 단계
1	`PMOS_n@node@_01_wafer_init`	웨이퍼 생성 / NWell 형성 후
2	`PMOS_n@node@_02_gate_oxide`	게이트 산화 후
3	`PMOS_n@node@_03_poly_deposit`	Poly 증착 후
4	`PMOS_n@node@_04_gate_pattern`	Poly/oxide 식각 후, 게이트 패턴닝 완료
5	`PMOS_n@node@_05_LDD_implant`	LDD 임플란트 후
6	`PMOS_n@node@_06_spacer_deposit`	스페이서용 질화막 증착 후
7	`PMOS_n@node@_07_spacer_etch`	스페이서 형성 완료 후
8	`PMOS_n@node@_08_SD_implant`	Source/Drain 임플란트 후
9	`PMOS_n@node@_09_anneal`	RTA(anneal) 후
10	`PMOS_n@node@_10_Al_deposit`	Al 금속 증착 후
11	`PMOS_n@node@_11_Al_etch`	Al 식각 후
12	`PMOS_n@node@_12_reflect`	Reflect 후, 대칭 구조 완성
13	`PMOS_n@node@_13_final_device`	contact 정의 후 최종 소자 완료

- 각 이미지에 대한 설명은 다음과 같다.

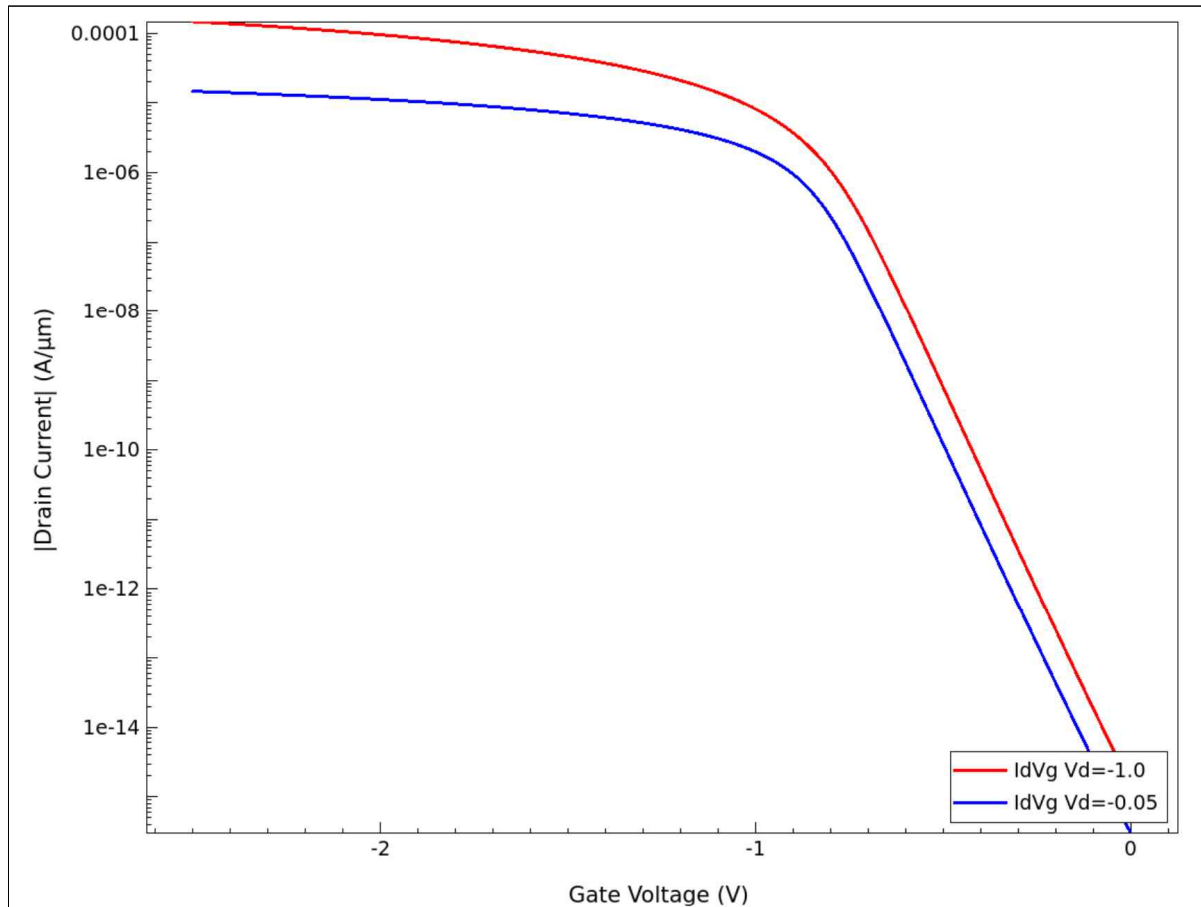
순번	공정 단계	구조 변화	소자 구조 해석
1	웨이퍼 생성 NWell 형성 후	Si 기판 위에 N-Well 도핑 형성된 초기구조	대부분이 파란색 Si 영역

2	Gate oxide 형성	Si 표면 위에 얇은 gate oxide 형성	기판 상단에 매우 얇은 색갈층(oxide) 형성
3	poly-Si 증착	Gate 전극으로 사용할 Poly-Si가 산화막 위에 증착	상단에 Poly 영역이 추가되어 파란색 계열의 층 생성
4	poly etch/패터닝 완료	증착된 Poly-Si 중 불필요한 부분 제거	특정 중앙 영역에만 파란 층이 남은 모습
5	LDD implant	Gate 양쪽에 얇은 저농도 LDD영역 형성	gate 양옆 표면 근처에 얇은 색 변화 발생
6	Spacer 물질 증착	Gate 주변과 표면 위에 spacer용 nitride 막이 증착	Gate 주변을 감싸듯이 새로운 막이 덮임
7	Spacer Etch	수평면의 nitride는 제거되고, gate 측벽에만 spacer가 남음	gate 양쪽 측면에만 spacer가 남아있는 모습
8	Source/Drain implant	Spacer 바깥쪽에 고농도 p+ source/drain 영역이 주입	gate와 spacer 바깥쪽 표면 부근에 강한 색변화
9	Source/Drain Anneal (RTA anneal 직후)	주입된 dopant가 활성화되고, 열처리에 의해 source/drain 영역이 확산된다	S/D도핑 영역이 이전보다 더 퍼진형태 (색 분포)
10	Al 금속 증착	전극 형성을 위해 Al 금속층이 증착된다. (식각전)	소자 상부에 새로운 금속층이 덮여있음(회색)
11	Al Etch	불필요한 Al을 제거하여 전극패턴 형성	Al이 필요한 부분에만 남아있다.
12	Reflect	1~11 과정으로 만든 절반 구조를 대칭복사하여 pMOS 단면 완성	이전 단계들과 달리 구조가 좌우로 확장되어 Source와 Drain이 대칭적으로 형성
13	Contact 정의 후 최종 완료	source, gate, drain contact이 정의되어 전기적 해석 가능한 최종 pMOS 구조가 완성	최종적으로 gate, source/drain, 금속 전극 및 contact 영역이 모두 구분되어 표시

- 최종 구조에서는 NWell 위에 p-type LDD 및 p+ source/drain 영역이 형성되고, gate oxide와 poly gate, spacer, metal contact이 순차적으로 완성되어 전기적 해석이 가능한 PMOS 단면 구조가 확보되었다.

4. 소자의 Transfer curve를 P-MOS에 맞게 구현

- 최적화하여 제작한 pMOS(과정 및 결과는 아래 5.에서 설명) 의 Transfer curve를 구현한 뒤, 해석하였다.



- 그래프를 보면, 게이트 전압이 0 V 부근일 때는 드레인 전류가 매우 작고, 게이트 전압을 음의 방향으로 인가할수록 드레인 전류가 급격히 증가한다. 이는 pMOSFET이 음의 게이트 전압에서 켜지고, 0 V 부근에서는 꺼지는 정상적인 enhancement-mode 특성을 보인다는 뜻이다. 이러한 구동 방향을 확인함으로써, pMOS 가 정상적으로 구동되고 있음을 확인할 수 있다.
- 또한 $V_d = -1.0$ V(빨간 곡선)에서 $V_d = -0.05$ V(파란 곡선)보다 전류 크기가 더 크게 나타난다. 이는 더 큰 드레인 전압에서 채널을 따라 흐르는 전류가 증가하기 때문이며, PMOS의 일반적인 transfer 특성과 일치한다. 두 곡선 모두 subthreshold 영역에서 비교적 가파른 기울기를 가지며, on 영역에서는 충분한 전류 크기를 확보하고 있어 낮은 leakage와 높은 on-current를 동시에 만족하는 방향으로 최적화되었음을 보여준다. SS는 subthreshold 영역에서 $\log(I_d)$ -Vg 곡선의 기울기와 관련된 값으로, 전류가 10배 증가하는 데 필요한 gate voltage 변화량을 의미한다. 따라서 SS가 작을수록 off 상태에서 on 상태로 더 급격하게 전환되는 소자라고 해석할 수 있다.

5. 구현한 pMOS에서 다음의 고정값을 사용하여 다양한 공정 parameter에 따른 특성을 조사하여, 주어진 전압범위에서 최선의 V_{th} , 최소의 $I_{min}(I_{off})$, 최대의 $I_{max}(I_{on})$, 최소의 SS를 구현할 것.

주어진 고정값
$L_g = 0.25$
$T_{ox} = 10\text{nm}$ (GOxTime 10에 해당)
NWell = 1e+17
LDD Dose < 1e+14

LDD_Energy < 10keV

S/D > 5e+15

S/D Energy < 10keV

RTA 1000°C < 10s

Target

$I_D (=I_{max}, @V_g=-2.5V) > 1e-5 \text{ A/um}$

Subthreshold Swing(SS) < 100

$I_{off} (=I_{min}, @V_g=0V) < 1e-14 \text{ A/um}$

공정 변수들은 서로 독립적이지 않고 상호작용할 수 있다. 따라서 가장 효율적인 값을 내는 LDD_Dose 값을 찾더라도, SD_Dose 혹은 LDD_E 등 다른 parameter의 값과 상호작용하여 해당 값이 가장 최적화된 결과를 내지 않을 수도 있고, 가장 비효율적으로 보였던 LDD_Dose 값이 최종적으로 가장 최적화된 결과를 낼 가능성도 있다. 따라서 이론적으로는 모든 변수를 동시에 변화시키는 방식이 최적의 결과를 도출하기에는 효율적이다. 그러나 본 진행방식에서는 각 변수가 발생시키는 효과를 먼저 파악한 뒤, 마지막 단계에서 상호작용을 확인하는 순차적 최적화 전략을 선택하였다. 그 이유는 처음부터 모든 변수를 동시에 변화시키면 좋은 결과를 얻을 수 있겠지만, 어떤 parameter가 해당 성능 변화의 주원인인지 해석하기 어렵고, 경우의 수도 과도하게 증가하기 때문에 불필요한 시간이 많이 소요된다. 따라서 먼저 LDD 조건을 통해 off 특성(I_{off} , SS)의 큰 경향을 파악하고, 이후 SD 조건으로 I_{on} 을 보강한 뒤, 마지막에 spacer를 통해 최종 trade-off를 조정한 뒤, 다시한번 각 parameter의 상호작용을 고려해서 3차례에 걸쳐 미세조정을 시도하였다. 이러한 방식은 상호작용을 무시한 행위가 아니라, 오히려 각 변수의 기본 역할을 이해한 상태에서 교차 영향을 더 명확히 해석하기 위한 접근이다.

이번 과제에서는 최적의 pMOS를 찾는 과정을 두 방법으로 나누어 진행한 뒤, 방법의 효율성까지 비교해 보려고한다. 두 방법을 나누는 기준은 '최적의 소자'를 판단하는 방법에 기반하여 구분한다. 첫 번째로는 각 split 된 parameter에 의한 결과값들을 각 수치상으로 비교하여 제거하는 방식으로 최적의 소자를 찾아갈 예정이다. 이때 기준은 SS는 더 낮은거, I_{on} 은 더 높은거, I_{off} 는 더 낮은거를 우선적으로 선택하며, 기준이 애매할 경우 (ex: SS는 더 높는데 I_{on} 은 더 낮음)에는 각 증가 및 감소 비율을 보고, 이를 기점으로 해당 data를 계속 사용할지 결정한다. 두 번째 방법은 그래프를 이용하여 각 지점들을 찍고, 구간을 나누어 해당 구간 안에 들어온 소자 data들만 사용하는 것이다. 이때 사용할 그래프는 I_{on}/I_{off} - SS 그래프이며, 전체 그래프를 4block 으로 나누어, 오른쪽 아래 block에 포함된 값들만들 가지고 다음 split 으로 넘어가는 방식으로 진행할 예정이다.

이러한 근거를 바탕으로 pMOS를 활용하여 target 내에서 가장 최적화 된 parameter 값들을 찾아 가는 공통 전략을 다음과 같이 세웠다.

① Baseline 설정 및 pMOS 정상구동 확인

② LDD 조건 최적화

→ I_{off} 와 SS에 가장 직접적인 영향을 주는 변수부터 확인

③ RTA 조건 변화

④ Source/Drain 조건 최적화

→ 확보된 I_{off} 와 SS 특성을 크게 해치지 않으면서 I_{on} 을 증가시킬 수 있는 방향 탐색

⑤ 추가적인 변수로 Spacer 조건 미세조정

→ ②, ③ 으로 확보된 상위 최적화 후보들 사이에서 새로운 parameter 도입으로 미세 조정
⑥ 최종 parameter 미세조정(3회 반복) 후 단일 최적값 선택

5-1. (방법1) 결과값 수치로 비교

▶ Baseline 설정 및 pMOS 정상구동 확인

	Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Vd	Vg	
1	0.25	10	1e+17	1e+17	1e+16	5	15	5	-1.0	-2.5	--
2				1e+17	1e+16	5	15	5	-0.05	-2.5	--
3				5e+13	1e+16	5	15	5	-1.0	-2.5	--
4				5e+13	1e+16	5	15	5	-0.05	-2.5	--
5				7e+13	1e+16	5	15	5	-1.0	-2.5	--
6				7e+13	1e+16	5	15	5	-0.05	-2.5	--
tox	Vtgm	Id	SS	gm	Vg0_actual	Ioff	Imin	Vgion_actual	Ion	Imax	
0.0101	-0.099	3.903e-04	1134.582	1.639e-04	0	2.76515736319e-05	2.76515736319e-05	-2.5	0.000390275720768	0.000390275720768	
0.0101	-0.452	4.338e-05	248.261	3.058e-05	0	1.83825955857e-08	1.83825955857e-08	-2.5	4.33838237085e-05	4.33838237085e-05	
0.0101	-1.145	1.359e-04	85.843	1.003e-04	0	5.52375512552e-16	5.52375512552e-16	-2.5	0.000135862301589	0.000135862301589	
0.0101	-0.845	1.359e-05	88.457	1.018e-05	0	1.66808104971e-16	1.66808104971e-16	-2.5	1.35851798743e-05	1.35851798743e-05	
0.0101	-1.142	1.380e-04	86.068	1.016e-04	0	6.30875620116e-16	6.30875620116e-16	-2.5	0.000137957246035	0.000137957246035	
0.0101	-0.843	1.389e-05	88.619	1.037e-05	0	1.82388803678e-16	1.82388803678e-16	-2.5	1.38889126995e-05	1.38889126995e-05	

- 처음 가이드에 나와있는 값과 다른 값들을 고정하고 LDD_Dose를 먼저 5e+13과 7e+13으로 split 해서 값 확인 했을 때, Vg = -2.5에서 Ion이 충분히 나오며 Vtgm 값이 음수로 나오고 tox가 0.0101(=10nm)인걸 확인해봄으로서 pMOS가 제대로 구동되고 있음을 확인 하였다. 또한 초기 baseline인 LDD_Dose = 1e+14 조건에서는 Ioff와 SS가 target을 만족하지 못하였다. 이후 LDD_Dose를 5e+13, 7e+13으로 낮추자 target 범위에 들어오는 조건들이 확인되었고, 더 좋은 균형점을 찾기 위해 LDD_Dose와 LDD_E를 더 넓게 split하였다.
- 또한 실습 가이드에서는 S/D Energy < 10 keV가 힌트로 제시되어 있으나, 해당 과정은 BF2 implant를 사용하였고, BF2 조건에서는 더 높은 에너지 범위에서도 shallow junction 및 충분한 S/D 형성을 비교할 필요가 있다고 판단하였다. 따라서 SD_E를 10~23 keV 범위까지 확장하여 탐색하였다.

▶ LDD 조건 최적화

- LDD_Dose 는 드레인 근처 extension의 도핑 세기를 결정하므로, 너무 크면 전기장이 강해져 Ioff와 SS가 악화되고, 너무 작으면 extension 저항이 커져 Ion이 감소할 수 있다. 따라서 1e+14를 기준으로 더 작은 5e+13, 7e+13 등으로 나누어 보면서 off 특성의 개선과 on-current 유지 사이의 균형점을 찾기 위해 Split 하였다. 또한 LDD_E 값은 3, 5, 7 keV 로 Split 하였다. LDD_E는 LDD implant의 깊이와 접합 형태를 결정하므로, 에너지가 너무 크면 접합이 깊어져 leakage가 증가하고, 너무 작으면 extension이 충분히 형성되지 않아 Ion이 떨어질 수 있다. 따라서 BF2를 사용하는 조건에서 낮은 에너지(3), 기준에너지(5), 상대적 고에너지(7)를 비교하며 얇은 접합으로 Ioff와 SS를 줄이면서도 필요한 Ion 범위를 찾으려 하였다.

LDD_Dose Split	
	3e+13
	4e+13
	5e+13
	6e+13
	7e+13
	8e+13
LDD_E Split	
	3

5
7

TCAD를 활용해 나온 결과값은 다음과 같다.

	Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Vd	Vg	tox	Vtgm	Id	SS	gm	Vg0_actual	Ioff	Imin	VgIon_actual	Ion	Imax
1									-1.0	-2.5	0.0101	-0.0995	3.903e-04	1134.582	1.639e-04	0.0000	2.765e-05	2.765e-05	-2.5000	3.903e-04	3.903e-04
2									-0.05	-2.5	0.0101	-0.4521	1.336e-05	248.261	3.059e-05	0.0000	1.836e-08	1.836e-08	-2.5000	4.336e-05	4.336e-05
3									-1.0	-2.5	0.0101	-0.9994	1.836e-04	94.933	1.224e-04	0.0000	6.959e-14	6.959e-14	-2.5000	1.836e-04	1.836e-04
4									-0.05	-2.5	0.0101	-0.7934	1.986e-05	94.920	1.461e-05	0.0000	3.858e-15	3.858e-15	-2.5000	1.986e-05	1.986e-05
5									-1.0	-2.5	0.0101	-0.3318	3.399e-04	532.984	1.577e-04	0.0000	5.509e-06	5.509e-06	-2.5000	3.399e-04	3.399e-04
6									-0.05	-2.5	0.0101	-0.5158	3.830e-05	190.413	2.717e-05	0.0000	2.210e-09	2.210e-09	-2.5000	3.830e-05	3.830e-05
7									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1454	1.359e-04	85.643	1.003e-04	0.0000	5.524e-16	5.524e-16	-2.5000	1.359e-04	1.359e-04
8									-0.05	-2.5	0.0101	-0.6446	1.359e-05	88.457	1.016e-05	0.0000	1.668e-16	1.668e-16	-2.5000	1.359e-05	1.359e-05
9									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1582	1.336e-04	85.737	9.960e-05	0.0000	4.572e-16	4.572e-16	-2.5000	1.336e-04	1.336e-04
10									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8490	1.340e-05	88.454	9.989e-06	0.0000	1.444e-16	1.444e-16	-2.5000	1.340e-05	1.340e-05
11									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1255	1.388e-04	85.827	1.010e-04	0.0000	7.475e-16	7.475e-16	-2.5000	1.388e-04	1.388e-04
12									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8352	1.380e-05	88.302	1.041e-05	0.0000	2.061e-16	2.061e-16	-2.5000	1.380e-05	1.380e-05
13									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1418	1.380e-04	86.068	1.016e-04	0.0000	6.309e-16	6.309e-16	-2.5000	1.380e-04	1.380e-04
14									-0.05	-2.5	0.0101	-0.6432	1.389e-05	88.619	1.037e-05	0.0000	1.824e-16	1.824e-16	-2.5000	1.389e-05	1.389e-05
15									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1555	1.359e-04	85.962	1.008e-04	0.0000	5.077e-16	5.077e-16	-2.5000	1.359e-04	1.359e-04
16									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8490	1.369e-05	88.569	1.017e-05	0.0000	1.553e-16	1.553e-16	-2.5000	1.369e-05	1.369e-05
17									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1211	1.410e-04	86.043	1.023e-04	0.0000	8.753e-16	8.753e-16	-2.5000	1.410e-04	1.410e-04
18									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8334	1.412e-05	88.434	1.061e-05	0.0000	2.277e-16	2.277e-16	-2.5000	1.412e-05	1.412e-05
19									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1506	1.327e-04	85.516	9.841e-05	0.0000	4.601e-16	4.601e-16	-2.5000	1.327e-04	1.327e-04
20									-0.05	-2.5	0.0101	-0.6463	1.313e-05	88.293	9.906e-06	0.0000	1.477e-16	1.477e-16	-2.5000	1.313e-05	1.313e-05
21									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1616	1.307e-04	85.474	9.771e-05	0.0000	3.963e-16	3.963e-16	-2.5000	1.307e-04	1.307e-04
22									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8507	1.296e-05	88.323	9.723e-06	0.0000	1.307e-16	1.307e-16	-2.5000	1.296e-05	1.296e-05
23									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1331	1.354e-04	85.468	9.910e-05	0.0000	5.864e-16	5.864e-16	-2.5000	1.354e-04	1.354e-04
24									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8382	1.333e-05	88.134	1.011e-05	0.0000	1.771e-16	1.771e-16	-2.5000	1.333e-05	1.333e-05
25									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1477	1.345e-04	85.688	9.949e-05	0.0000	5.086e-16	5.086e-16	-2.5000	1.345e-04	1.345e-04
26									-0.05	-2.5	0.0101	-0.6453	1.338e-05	88.377	1.006e-05	0.0000	1.579e-16	1.579e-16	-2.5000	1.338e-05	1.338e-05
27									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1598	1.323e-04	85.619	9.876e-05	0.0000	4.286e-16	4.286e-16	-2.5000	1.323e-04	1.323e-04
28									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8503	1.320e-05	88.398	9.971e-06	0.0000	1.390e-16	1.390e-16	-2.5000	1.320e-05	1.320e-05
29									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1288	1.373e-04	85.853	1.002e-04	0.0000	6.688e-16	6.688e-16	-2.5000	1.373e-04	1.373e-04
30									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8366	1.359e-05	88.228	1.028e-05	0.0000	1.928e-16	1.928e-16	-2.5000	1.359e-05	1.359e-05
31									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1435	1.370e-04	85.972	1.010e-04	0.0000	5.930e-16	5.930e-16	-2.5000	1.370e-04	1.370e-04
32									-0.05	-2.5	0.0101	-0.6439	1.375e-05	88.540	1.029e-05	0.0000	1.748e-16	1.748e-16	-2.5000	1.375e-05	1.375e-05
33									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1567	1.347e-04	85.858	1.003e-04	0.0000	4.837e-16	4.837e-16	-2.5000	1.347e-04	1.347e-04
34									-0.05	-2.5	0.0101	-0.6494	1.356e-05	88.508	1.009e-05	0.0000	1.501e-16	1.501e-16	-2.5000	1.356e-05	1.356e-05
35									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1231	1.400e-04	85.958	1.017e-04	0.0000	8.151e-16	8.151e-16	-2.5000	1.400e-04	1.400e-04
36									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8342	1.397e-05	88.375	1.051e-05	0.0000	2.174e-16	2.174e-16	-2.5000	1.397e-05	1.397e-05
37									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1402	1.388e-04	86.141	1.021e-04	0.0000	6.664e-16	6.664e-16	-2.5000	1.388e-04	1.388e-04
38									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8427	1.401e-05	88.688	1.045e-05	0.0000	1.895e-16	1.895e-16	-2.5000	1.401e-05	1.401e-05
39									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1543	1.363e-04	86.044	1.013e-04	0.0000	5.300e-16	5.300e-16	-2.5000	1.363e-04	1.363e-04
40									-0.05	-2.5	0.0101	-0.6486	1.380e-05	88.638	1.024e-05	0.0000	1.602e-16	1.602e-16	-2.5000	1.380e-05	1.380e-05
41									-1.0	-2.5	0.0101	-1.1194	1.419e-04	86.103	1.028e-04	0.0000	9.307e-16	9.307e-16	-2.5000	1.419e-04	1.419e-04
42									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8328	1.425e-05	88.480	1.069e-05	0.0000	2.372e-16	2.372e-16	-2.5000	1.425e-05	1.425e-05

해당 결과를 분석하면 LDD_E = 3 keV 조건에서는 전반적으로 I_{off}와 SS는 양호해졌지만 I_{on}이 상대적으로 낮게 나타나는 경향이 있었다.

예를 들어 baseline에 가까운 LDD_Dose = 1e+14 조건에서

LDD_E = 3일 때

Ion ≈ 1.836e-04

Ioff ≈ 6.959e-14

SS ≈ 94.933

LDD_E = 5일 때

Ion ≈ 3.903e-04

Ioff ≈ 2.765e-05

SS ≈ 1134.582

LDD_E = 7일 때

Ion ≈ 3.399e-04

Ioff ≈ 5.509e-06

SS ≈ 532.984

위 결과처럼, 3 keV는 전류를 너무 희생하는 대신 leakage를 줄이는 방향, 5 keV와 7 keV는 I_{on}은 크지만 baseline에서는 leakage가 여전히 큰 상태였다. 그러나 LDD_Dose가 5e+13 ~ 8e+13 구간으로 내려오면서 LDD_E = 7 keV 조건에서도 I_{off}와 SS가 충분히 target 안으로 들어오기 시작했고, 동시에 I_{on}은 가장 크게 유지되는 경향이 나타났다.

대표적으로 Vd = -1.0 V 기준에서:

LDD_Dose = 5e+13, LDD_E = 3

Ion ≈ 1.336e-04

Ioff ≈ 4.572e-16

SS $\approx$ 85.737

LDD_Dose = 5e+13, LDD_E = 5

I_{on} $\approx$ 1.359e-04

I_{off} $\approx$ 5.524e-16

SS $\approx$ 85.843

LDD_Dose = 5e+13, LDD_E = 7

I_{on} $\approx$ 1.388e-04

I_{off} $\approx$ 7.475e-16

SS $\approx$ 85.827

해당 결과에서 알 수 있듯, LDD_E = 7은 I_{off}와 SS가 여전히 양호한 수준을 유지하면서도, I_{on}이 가장 크게 나타났다. 같은 경향은 LDD_Dose가 6e+13, 7e+13, 8e+13 수준에서도 반복되었다.

LDD_Dose = 6e+13

E = 3 $\rightarrow$ I_{on} $\approx$ 1.356e-04, I_{off} $\approx$ 1.501e-16, SS $\approx$ 88.508

E = 5 $\rightarrow$ I_{on} $\approx$ 1.375e-04, I_{off} $\approx$ 1.748e-16, SS $\approx$ 88.540

E = 7 $\rightarrow$ I_{on} $\approx$ 1.400e-04, I_{off} $\approx$ 8.151e-16, SS $\approx$ 85.958

LDD_Dose = 7e+13

E = 3 $\rightarrow$ I_{on} $\approx$ 1.355e-04, I_{off} $\approx$ 5.077e-16, SS $\approx$ 85.962

E = 5 $\rightarrow$ I_{on} $\approx$ 1.380e-04, I_{off} $\approx$ 6.309e-16, SS $\approx$ 86.068

E = 7 $\rightarrow$ I_{on} $\approx$ 1.410e-04, I_{off} $\approx$ 8.753e-16, SS $\approx$ 86.043

LDD_Dose = 8e+13

E = 3 $\rightarrow$ I_{on} $\approx$ 1.380e-04, I_{off} $\approx$ 1.602e-16, SS $\approx$ 88.638

E = 5 $\rightarrow$ I_{on} $\approx$ 1.401e-04, I_{off} $\approx$ 1.895e-16, SS $\approx$ 88.668

E = 7 $\rightarrow$ I_{on} $\approx$ 1.419e-04, I_{off} $\approx$ 9.307e-16, SS $\approx$ 86.103

위 결과를 종합하면, 에너지가 3 keV 일 때 leakage 는 굉장히 작은 값을 나타내지만 I_{on}이 상대적으로 낮고, 7 keV 일때는 I_{on} 이 가장 크고, I_{off}와 SS 도 target 범위 내에서 유지되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 E 값이 커질수록 I_{on} 값이 커짐을 확인할 수 있었고, 더 커지면 leakage 가 증가할 가능성이 높기에, LDD_E = 7 keV를 가지고 다른 parameter 들을 Split 해보기로 결정했다. 또한 I_{on} 값이 크게 확보되면서 I_{off}와 SS가 target 안에 유지되는 LDD_Dose 범위인 6e+13~8e+13 값만 남기기로 하였다.

사실 LDD_Dose = 3e+13과 4e+13는 leakage와 SS 측면에서는 꽤 우수했다. 실제로 해당 구간은 I_{off}가 매우 낮고 SS도 target 안에 안정적으로 들어오는 경우가 많았다. 그러나 전체 균형을 봤을 때, 6e+13 ~ 8e+13 구간보다 최종 I_{on}이 다소 불리한 경향이 나타났다.

예를 들어 같은 LDD_E = 7 기준으로 볼 때

LDD_Dose = 3e+13 $\rightarrow$ I_{on}이 약 1.354e-04

LDD_Dose = 4e+13 $\rightarrow$ I_{on}이 약 1.373e-04

LDD_Dose = 7e+13 $\rightarrow$ I_{on}이 약 1.410e-04

LDD_Dose = 8e+13 $\rightarrow$ I_{on}이 약 1.419e-04

처럼, dose가 너무 낮은 쪽은 I_{on}이 눈에 띄게 작았다. 반면 I_{off}와 SS는 이미 6e13~8e13 구간에서

도 충분히 target 안에 들어와 있었기 때문에, 굳이 I_{on} 이 약한 $3e13$, $4e13$ 를 계속 유지할 필요가 없었다.

▶ RTA 조건 변화

- RTA 는 다음과 같이 split 하였다.

RTA split
3
5
7

- RTA 시간이 증가하면 dopant activation이 증가해서 source/drain 저항이 줄고 I_{on} 이 좋아질 수 있다. 하지만 RTA가 너무 길어지면 dopant diffusion이 커져 junction이 깊어지거나 LDD 영역이 퍼지면서 I_{off} 가 증가하고 SS가 나빠질 수 있어. 이러한 원인으로 Split 한 결과에서 RTA 5가 가장 효율이 괜찮았다고 판단하여 RTA 5를 유지한 채 다음 단계로 넘어갔다.

▶ Source/Drain 조건 최적화

LDD 조건 최적화 이후, SD_Dose와 SD_E를 split 하여 I_{on} 을 더 향상시키는 방향으로 최적화를 진행했다.

Source/drain 조건은 source/drain 저항과 접합 깊이를 직접 변화시키므로, on-current(I_{on})에 큰 영향을 미칠 수 있다. 일반적으로 SD_Dose나 SD_E가 증가하면 source/drain이 더 강하게 형성되어 직렬저항이 줄어들 수 있으므로 I_{on} 이 증가할 가능성이 있다. 그러나 이 값들이 지나치게 커지면 접합이 깊어지고 drain 쪽 전기장 영향이 커져, I_{off} 와 SS가 다시 악화될 수 있다. 따라서 이번 최적화에서는 $2e+16$ 이라는 중간 SD_Dose 값을 기준으로 잡고, 위 아래로 값을 흔들어보려고 한다. 또한 SD_E는 접합 깊이가 shallow, medium, relatively deep 쪽으로 이동할 때 어떤 변화가 나타나는지 보기 위해 값을 10~20 사이로 넓게 설정하였다. 최종적으로 split한 SD_Dose와 SD_E 값은 다음과 같다.

SD_Dose Split
$1e+16$
$2e+16$
$5e+16$
SD_E
10
15
20

해당 조건들로 나온 결과값은 다음과 같다.

	Lg	G0xTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Vd	Vg	tox	Vtgm	ld	SS	gm	Vg0_actual	loff	lmin	Vgion_actual	lon	imax
1								15	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1211	1.410e-04	86.043	1.023e-04	0.0000	8.753e-16	1.410e-04	1.410e-04
2									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8334	1.412e-04	86.434	1.061e-05	0.0000	2.277e-16	2.277e-16	1.412e-05
3								20	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1253	1.401e-04	86.118	1.020e-04	0.0000	8.114e-16	8.114e-16	1.401e-04
4									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8353	1.403e-04	86.522	1.056e-05	0.0000	2.137e-16	2.137e-16	1.403e-05
5									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1199	1.430e-04	85.937	1.030e-04	0.0000	1.932e-15	1.932e-15	1.430e-04
6								20	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8291	1.439e-04	86.275	1.071e-05	0.0000	2.449e-16	2.449e-16	1.439e-05
7									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1190	1.416e-04	85.998	1.026e-04	0.0000	9.053e-16	9.053e-16	1.416e-04
8								15	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8325	1.419e-04	86.381	1.063e-05	0.0000	2.250e-16	2.250e-16	1.419e-05
9									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1210	1.413e-04	86.056	1.025e-04	0.0000	8.825e-16	8.825e-16	1.413e-04
10								10	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8332	1.416e-04	86.444	1.063e-05	0.0000	2.290e-16	2.290e-16	1.416e-05
11									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0977	1.456e-04	85.824	1.039e-04	0.0000	1.307e-15	1.307e-15	1.456e-04
12								20	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8230	1.453e-04	86.062	1.087e-05	0.0000	2.763e-16	2.763e-16	1.453e-05
13									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0899	1.437e-04	85.899	1.034e-04	0.0000	1.082e-15	1.082e-15	1.437e-04
14								15	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8281	1.439e-04	86.222	1.075e-05	0.0000	2.527e-16	2.527e-16	1.439e-05
15									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1043	1.447e-04	85.891	1.037e-04	0.0000	1.176e-15	1.176e-15	1.447e-04
16								10	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8259	1.448e-04	86.174	1.083e-05	0.0000	2.632e-16	2.632e-16	1.448e-05
17									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0969	1.458e-04	85.792	1.040e-04	0.0000	1.332e-15	1.332e-15	1.458e-04
18								20	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8224	1.457e-04	86.013	1.087e-05	0.0000	2.765e-16	2.765e-16	1.457e-05
19									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1231	1.400e-04	85.958	1.017e-04	0.0000	8.151e-16	8.151e-16	1.400e-04
20								15	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8342	1.397e-04	86.375	1.051e-05	0.0000	2.174e-16	2.174e-16	1.397e-05
21									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1274	1.391e-04	86.033	1.014e-04	0.0000	7.539e-16	7.539e-16	1.391e-04
22								10	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8362	1.388e-04	86.466	1.047e-05	0.0000	2.036e-16	2.036e-16	1.388e-05
23									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1127	1.420e-04	85.853	1.024e-04	0.0000	9.629e-16	9.629e-16	1.420e-04
24								20	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8298	1.415e-04	86.214	1.063e-05	0.0000	2.339e-16	2.339e-16	1.415e-05
25									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1210	1.406e-04	85.911	1.020e-04	0.0000	8.439e-16	8.439e-16	1.406e-04
26								15	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8333	1.404e-04	86.320	1.054e-05	0.0000	2.147e-16	2.147e-16	1.404e-05
27									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1231	1.402e-04	85.975	1.019e-04	0.0000	8.208e-16	8.208e-16	1.402e-04
28								10	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8341	1.401e-04	86.387	1.054e-05	0.0000	2.184e-16	2.184e-16	1.401e-05
29								20	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0994	1.447e-04	85.741	1.034e-04	0.0000	1.221e-15	1.221e-15	1.447e-04
30									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8236	1.440e-04	87.999	1.078e-05	0.0000	2.641e-16	2.641e-16	1.440e-05
31								15	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1107	1.426e-04	85.814	1.029e-04	0.0000	1.011e-15	1.011e-15	1.426e-04
32									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8288	1.425e-04	86.159	1.087e-05	0.0000	2.418e-16	2.418e-16	1.425e-05
33								10	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0862	1.437e-04	85.809	1.032e-04	0.0000	1.097e-15	1.097e-15	1.437e-04
34									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8266	1.435e-04	86.115	1.074e-05	0.0000	2.513e-16	2.513e-16	1.435e-05
35								20	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0984	1.449e-04	85.706	1.035e-04	0.0000	1.249e-15	1.249e-15	1.449e-04
36									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8229	1.444e-04	87.945	1.078e-05	0.0000	2.647e-16	2.647e-16	1.444e-05
37								15	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1194	1.419e-04	86.103	1.028e-04	0.0000	9.307e-16	9.307e-16	1.419e-04
38									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8326	1.425e-04	86.480	1.069e-05	0.0000	2.372e-16	2.372e-16	1.425e-05
39								10	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1234	1.411e-04	86.177	1.025e-04	0.0000	8.646e-16	8.646e-16	1.411e-04
40									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8346	1.417e-04	86.567	1.084e-05	0.0000	2.231e-16	2.231e-16	1.417e-05
41								15	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1093	1.438e-04	86.000	1.035e-04	0.0000	1.097e-15	1.097e-15	1.438e-04
42								20	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8295	1.441e-04	86.321	1.079e-05	0.0000	2.548e-16	2.548e-16	1.441e-05
14								15	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8291	1.439e-04	86.222	1.075e-05	0.0000	2.527e-16	2.527e-16	1.439e-05
15									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1043	1.447e-04	85.891	1.037e-04	0.0000	1.176e-15	1.176e-15	1.447e-04
16								10	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8259	1.448e-04	86.174	1.083e-05	0.0000	2.632e-16	2.632e-16	1.448e-05
17									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0969	1.458e-04	85.792	1.040e-04	0.0000	1.332e-15	1.332e-15	1.458e-04
18								20	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8224	1.457e-04	86.013	1.087e-05	0.0000	2.765e-16	2.765e-16	1.457e-05
19									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1231	1.400e-04	85.958	1.017e-04	0.0000	8.151e-16	8.151e-16	1.400e-04
20								15	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8342	1.397e-04	86.375	1.051e-05	0.0000	2.174e-16	2.174e-16	1.397e-05
21									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1274	1.391e-04	86.033	1.014e-04	0.0000	7.539e-16	7.539e-16	1.391e-04
22								10	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8362	1.388e-04	86.466	1.047e-05	0.0000	2.036e-16	2.036e-16	1.388e-05
23									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1127	1.420e-04	85.853	1.024e-04	0.0000	9.629e-16	9.629e-16	1.420e-04
24								20	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8298	1.415e-04	86.214	1.063e-05	0.0000	2.339e-16	2.339e-16	1.415e-05
25									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1210	1.406e-04	85.911	1.020e-04	0.0000	8.439e-16	8.439e-16	1.406e-04
26								15	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8333	1.404e-04	86.320	1.054e-05	0.0000	2.147e-16	2.147e-16	1.404e-05
27									S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1231	1.402e-04	85.975	1.019e-04	0.0000	8.208e-16	8.208e-16	1.402e-04
28								10	S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8341	1.401e-04	86.387	1.054e-05	0.0000	2.184e-16	2.184e-16	1.401e-05
29								20	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0994	1.447e-04	85.741	1.034e-04	0.0000	1.221e-15	1.221e-15	1.447e-04
30									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8236	1.440e-04	87.999	1.078e-05	0.0000	2.641e-16	2.641e-16	1.440e-05
31								15	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1107	1.426e-04	85.814	1.029e-04	0.0000	1.011e-15	1.011e-15	1.426e-04
32									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8288	1.425e-04	86.159	1.087e-05	0.0000	2.418e-16	2.418e-16	1.425e-05
33								10	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0862	1.437e-04	85.809	1.032e-04	0.0000	1.097e-15	1.097e-15	1.437e-04
34									S	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8266	1.435e-04	86.115	1.074e-05	0.0000	2.513e-16	2.513e-16	1.435e-05
35								20	S	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0994	1.449e-04	85.706	1.035e-04	0.0000	1.249e-15	1.249e-15	1.449e-04
36									S	-0.05	-2.5	--	0.0101								

현재까지 가장 좋은 조합 순서는 다음과 같다.

1순위	
LDD_Dose = 8e+13 LDD_E = 7 SD_Dose = 5e+16 SD_E = 20	Vtgm $\approx$ -1.0955 $I_{off} \approx 1.411e-15$ $I_{on} \approx 1.466e-4$ SS ≈ 85.861
특징	
현재 나온 결과들 중 I_{on} 이 가장 크고, I_{off} 와 SS 도 target 범위 내에서 충분히 최적화되어있다.	
2순위	
LDD_Dose = 7e+13 LDD_E = 7 SD_Dose = 5e+16 SD_E = 20	Vtgm $\approx$ -1.0969 $I_{off} \approx 1.332e-15$ $I_{on} \approx 1.458e-4$ SS ≈ 85.792
특징	
1순위보다 I_{on} 은 아주 조금 감소했으나, I_{off} 와 SS 는 약간 더 좋은 효율을 보인다. (더 균형적)	
3순위	
LDD_Dose = 7e+13 LDD_E = 7 SD_Dose = 2e+16 SD_E = 20	Vtgm $\approx$ -1.0977 $I_{off} \approx 1.307e-15$ $I_{on} \approx 1.456e-4$ SS ≈ 85.824
특징	
SD_Dose를 낮췄음에도 I_{on} 이 크게 줄지 않으면서도 I_{off} 가 조금 더 낮은 결과를 나타냈다. 이후 진행할 Spacer 조정 과정에서, Spacer 와의 상호작용을 고려해 비교군으로 가져가기 좋다.	

이후, 경우의 수가 너무 많아지는 것을 막기 위해, 상위권 조건을 중심으로 후보를 줄였다.

- LDD_Dose = 6e+13 조건도 양호한 결과를 보였으나, 7e+13과 8e+13 구간이 전체적으로 더 높은 I_{on} 을 제공하면서 I_{off} , SS도 충분히 양호하였다. 즉, 이후 비교에서는 6e+13보다 7e+13, 8e+13이 더 유의미한 결과를 나타낼 것으로 예상되어 LDD_Dose = 6e+13 값을 제거하였다.
- SD_Dose = 1e+ 16은 기준 조건으로서 의미는 있었지만, 상위권 후보들과 비교했을 때 I_{on} 이 상대적으로 불리한 결과가 나오는 경우가 많았다. 따라서 이후 단계에서는 2e+16과 5e+16 중심으로 더 정밀하게 비교하는 것이 효율적이라고 판단하였다.

또한 SD_E도 해당 과정을 통해 20 keV 근방에서 가장 최적화된 조건이 나올 것으로 예상되어, 이후에는 20 keV를 중심으로 더 좁은 범위에서 미세조정하는 방향으로 진행하였다.

▶ Spacer 조건 변화

Spacer는 게이트 측벽에 남는 절연막 구조로, 게이트와 source/drain 사이의 물리적 간격을 결정하는 역할을 한다. 이 간격이 바뀌면 source/drain implant가 채널 가까이 형성되는 정도가 달라지고, 결국 전기장 분포, 직렬저항, 누설전류, subthreshold 특성이 모두 영향을 받게 된다.

③ Spacer 가 얇아질 경우

- Spacer가 얇으면 source/drain implant 영역이 게이트 가장자리와 더 가까운 위치까지 형성된다. 그러면 채널과 source/drain 사이 거리가 짧아져 전류가 흐르기 쉬워지므로 I_{on} 은 증가하는 방향으로 갈 수 있다. 하지만 동시에 drain 근처 전기장이 더 강해지고, 채널 제어가 어려워져 I_{off} 가 증가

하고 SS가 악화될 가능성이 커진다.

㉔ Spacer 가 두꺼워질 경우

- Spacer가 두꺼우면 source/drain implant가 게이트로부터 더 멀리 떨어진 영역에 형성된다.

이로 인해 drain 근처 전기장이 완화되고, 채널과 source/drain이 어느 정도 분리되어 I_{off} 와 SS는 개선될 수 있다. 반면 source/drain과 채널 사이 경로가 길어져 직렬저항이 증가하고 I_{on} 은 감소할 가능성이 있다.

㉕ Spacer 변경 이유

- Spacer는 막 두께 하나를 바꾸는 단순한 공정으로 보여지지만, 실제로는 LDD와 S/D implant의 위치관계와 게이트 끝단 근처 전기장, 그리고 채널과 S/D 사이의 유효거리를 동시에 바꾸는 중요한 parameter 이다. 이로 인해 spacer 조건이 달라지면, I_{on} , I_{off} , SS 값과 경우에 따라 V_{th} 까지 동시에 달라질 수도 있다. 따라서 지금까지 LDD와 SD를 조정해 가며 최적의 조건을 찾았기에, 새로운 변수인 Spacer 공정을 도입하여 마지막 미세조정 전 세부 조정 절차를 진행하려고한다.

Spacer 증착을 위해 기존 상수값으로 설정되어있는 코드를 변수로 변경할 필요가 있다. 기존 SProcess에 설계되어있는 Spacer 부분 코드는 다음과 같다.

```
## step Spacer formation
deposit Nitride type= isotropic thickness= 0.3*@Lg@
etch Nitride type= anisotropic thickness= 0.35*@Lg@
```

원래는 질화막을 $0.3 \cdot L_g$ 두께로 증착하고, $0.35 \cdot L_g$ 만큼 식각을 진행하는 코드를, 다음과 같이 변경하였다.

```
deposit Nitride type=isotropic thickness=@Spacer_Dep@*@Lg@
etch Nitride type=anisotropic thickness=(@Spacer_Dep@+0.05)*@Lg@
```

기존에는 0.3 상수값으로 되어있던 두께 값을 @Spacer_Dep@ 변수로 변경하였다. 또한 Spacer 두께를 바꾸고 싶을 때 deposit만 바꾸고 etch를 고정하면(ex 기존값 0.35), 어떤 경우에는 spacer가 거의 안 남거나 과도하게 깎여서 구조가 불안정해질 수 있다.

예를 들어 deposit은 매우 얇게 했는데 etch는 크게 고정되어 있으면, 질화막이 너무 많이 제거되어 spacer 역할을 거의 못 하게 될 수 있다. 그래서 본 코드에서는

```
deposit thickness를 @Spacer_Dep@*@Lg@
etch thickness를 (@Spacer_Dep@+0.05)*@Lg@
```

처럼 연동시켜서, spacer parameter를 바꿀 때마다 그에 맞는 식각량도 함께 조정되도록 했다.

이를 통해 각 spacer 조건에서 안정적인 구조를 형성할 수 있었다.

해당 Spacer_Dep parameter는 기존값이었던 0.3을 기준으로 위 아래로 변경하였다.

Spacer_Dep Split
0.25
0.3
0.35

결과는 다음과 같다.

	Lg	G0xTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Spacer_Dep	Vd	Vg	tox	Vtgm	Id	SS	gm	Vg0_actual	Ioff	Imin	Vgion_actual	Ion	Imax	
1									0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0845	1.482e-04	85.785	1.048e-04	0.0000	1.710e-15	1.710e-15	-2.5000	1.482e-04	1.482e-04
2										-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8163	1.480e-05	87.858	1.103e-05	0.0000	3.204e-16	3.204e-16	-2.5000	1.480e-05	1.480e-05
3					2e+16	7	20	5		-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0977	1.456e-04	85.824	1.039e-04	0.0000	1.307e-15	1.307e-15	-2.5000	1.456e-04	1.456e-04
4									0.35	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8230	1.453e-05	88.062	1.087e-05	0.0000	2.763e-16	2.763e-16	-2.5000	1.453e-05	1.453e-05
5										-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1053	1.437e-04	85.884	1.031e-04	0.0000	1.120e-15	1.120e-15	-2.5000	1.437e-04	1.437e-04
6						7e+13				-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8270	1.431e-05	88.202	1.075e-05	0.0000	2.529e-16	2.529e-16	-2.5000	1.431e-05	1.431e-05
7									0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0923	1.468e-04	85.716	1.043e-04	0.0000	1.454e-15	1.454e-15	-2.5000	1.468e-04	1.468e-04
8										-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8197	1.467e-05	87.885	1.091e-05	0.0000	2.893e-16	2.893e-16	-2.5000	1.467e-05	1.467e-05
9										-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0969	1.456e-04	85.792	1.040e-04	0.0000	1.332e-15	1.332e-15	-2.5000	1.456e-04	1.456e-04
10					5e+16	7	20	5		-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8224	1.457e-05	88.013	1.087e-05	0.0000	2.765e-16	2.765e-16	-2.5000	1.457e-05	1.457e-05
11									0.35	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1090	1.431e-04	85.872	1.029e-04	0.0000	1.050e-15	1.050e-15	-2.5000	1.431e-04	1.431e-04
12										-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8285	1.427e-05	88.217	1.070e-05	0.0000	2.425e-16	2.425e-16	-2.5000	1.427e-05	1.427e-05
13	0.25	10	1e+17						0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0833	1.490e-04	85.865	1.052e-04	0.0000	1.811e-15	1.811e-15	-2.5000	1.490e-04	1.490e-04
14										-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8159	1.491e-05	87.911	1.110e-05	0.0000	3.321e-16	3.321e-16	-2.5000	1.491e-05	1.491e-05
15									0.35	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0963	1.464e-04	85.893	1.044e-04	0.0000	1.389e-15	1.389e-15	-2.5000	1.464e-04	1.464e-04
16										-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8224	1.465e-05	88.109	1.095e-05	0.0000	2.876e-16	2.876e-16	-2.5000	1.465e-05	1.465e-05
17										-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1030	1.446e-04	85.948	1.036e-04	0.0000	1.192e-15	1.192e-15	-2.5000	1.446e-04	1.446e-04
18									0.35	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8284	1.444e-05	88.246	1.084e-05	0.0000	2.635e-16	2.635e-16	-2.5000	1.444e-05	1.444e-05
19										-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0910	1.475e-04	85.789	1.048e-04	0.0000	1.535e-15	1.535e-15	-2.5000	1.475e-04	1.475e-04
20									0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8193	1.478e-05	87.943	1.098e-05	0.0000	3.000e-16	3.000e-16	-2.5000	1.478e-05	1.478e-05
21										-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0955	1.466e-04	85.861	1.044e-04	0.0000	1.411e-15	1.411e-15	-2.5000	1.466e-04	1.466e-04
22									0.35	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8219	1.468e-05	88.065	1.094e-05	0.0000	2.873e-16	2.873e-16	-2.5000	1.468e-05	1.468e-05
23										-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.1075	1.440e-04	85.938	1.035e-04	0.0000	1.116e-15	1.116e-15	-2.5000	1.440e-04	1.440e-04
24									0.35	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8279	1.440e-05	88.267	1.078e-05	0.0000	2.524e-16	2.524e-16	-2.5000	1.440e-05	1.440e-05

결과값을 보면, 거의 모든 조합에서 Spacer_Dep 변화에 따른 차이를 공통적으로 확인할 수 있었다. 위에서 Spacer 두께에 따른 결과값을 예상했던 것과 동일하게, Spacer가 얇을수록 I_{on} 이 좋은 효율을 보이고, Spacer가 두꺼울수록 I_{off} 가 좋은 효율을 보이는 것을 확인 할 수 있었다. I_{on} 만 기준으로 보고 가장 강한 소자를 고르면

I_{on} 이 가장 높은 소자	
LDD_Dose = 8e+13 LDD_E = 7 SD_Dose = 2e+16 SD_E = 20 Spacer_Dep = 0.25	Vtgm = -1.0833 I_{on} = 1.490e-4 I_{off} = 1.811e-15 SS = 85.865
특징	
I_{on} 하나만 보면 가장 강한 소자이다. 그러나 I_{off} 와 SS의 균형을 고려할 필요가 있다.	

따라서 I_{off} 와 SS까지 고려하여 지금까지 가장 최적화가 잘 된 소자는 다음과 같다.

미세조정 전 가장 최적화 된 소자	
NWell = 1e+17 LDD_Dose = 7e+13 SD_Dose = 5e+16 LDD_E = 7 SD_E = 20 RTA = 5 Spacer_Dep = 0.25	Vtgm = -1.0923 I_{on} = 1.466e-4 I_{off} = 1.454e-15 SS = 85.716
특징	
I_{on} 이 매우 높고, I_{off} 는 더 낮으면서 SS도 꽤 낮은 측에 속하기에, 전체 균형이 가장 좋음	

▶ 최종 parameter 미세조정(3회 반복) 후 단일 최적값 선택

(1) parameter 미세조정

Spacer 조정 단계에서 최종적으로 가장 최적화 된 parameter 값에서 몇까지 값을 고정 한 뒤, 더 세밀한 범위에서 값들을 조정하면서 가장 효율적인 최적화된 소자를 구현해야한다. 시작 기준점은 가장 최근에 최적화 된 값을 기준으로 SD_Dose와 SD_E를 조정하려고한다.

(2) parameter 미세조정 1회 시도

미세조정(1회)	
고정값	추가 split 값
Lg = 0.25	SD_Dose
GOxTime = 10	4e+16
NWell = 1e+17	5e+16
LDD_Dose = 7e+13	6e+16
LDD_E = 7	SD_E
RTA = 5	18
Spacer_Dep = 0.25	20
Vd = -0.05, -1.0	22
Vg = -2.5	

가장 최적 소자의 SD_Dose는 5e+16, SD_E는 20 근처임을 확인했기에, 해당 값 주변을 좁게 split 하여 I_{off} 와 SS 손해가 거의 없는 지점을 찾으려고 한다. SD_Dose 가 올라가면 I_{on} 은 증가하는경향을 보이겠지만, 너무 커지면 I_{off} 가 다시 커질 수 있다. 또한 SD_E가 올라가면 접합이 깊어져 I_{on} 관점에서는 유리하겠지만, 너무 크면 I_{off} 와 SS가 불리해 줄수 있다. 현재 off 특성은 매우 좋기에 해당 특성은 유지시키면서 I_{on} 을 더 끌어올릴 수 있는 지를 확인하는 것이 해당 Split의 주 목적이다.

Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Spacer_Dep	Vd	Vg	tox	Vtgm	ld	SS	gm	Vg0_actual	Ioff	Imin	Vgion_actual	Ion	Imax
1								0.25	-1.0	-2.5	0.0101	-1.0845	1.482e-04	85.785	1.048e-04	0.0000	1.710e-15	1.710e-15	-2.5000	1.482e-04	1.482e-04
2				2e+16	7	20	5	0.25	-0.05	-2.5	0.0101	-0.8163	1.480e-05	87.858	1.103e-05	0.0000	3.204e-16	3.204e-16	-2.5000	1.480e-05	1.480e-05
3						18	5	0.25	-1.0	-2.5	0.0101	-1.0996	1.456e-04	85.812	1.040e-04	0.0000	1.277e-15	1.277e-15	-2.5000	1.456e-04	1.456e-04
4									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8233	1.457e-05	88.046	1.086e-05	0.0000	2.789e-16	2.789e-16	-2.5000	1.457e-05	1.457e-05
5						22	5	0.25	-1.0	-2.5	0.0101	-1.0993	1.453e-04	85.755	1.038e-04	0.0000	1.262e-15	1.262e-15	-2.5000	1.453e-04	1.453e-04
6									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8232	1.453e-05	87.932	1.082e-05	0.0000	2.700e-16	2.700e-16	-2.5000	1.453e-05	1.453e-05
7									-1.0	-2.5	0.0101	-1.0923	1.468e-04	85.716	1.043e-04	0.0000	1.454e-15	1.454e-15	-2.5000	1.468e-04	1.468e-04
8									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8197	1.467e-05	87.885	1.091e-05	0.0000	2.893e-16	2.893e-16	-2.5000	1.467e-05	1.467e-05
9				5e+16	7	18	5	0.25	-1.0	-2.5	0.0101	-1.0628	1.523e-04	85.913	1.061e-04	0.0000	2.748e-15	2.748e-15	-2.5000	1.523e-04	1.523e-04
10									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8062	1.518e-05	87.657	1.127e-05	0.0000	4.186e-16	4.186e-16	-2.5000	1.518e-05	1.518e-05
11									-1.0	-2.5	0.0101	-1.0894	1.473e-04	85.661	1.044e-04	0.0000	1.535e-15	1.535e-15	-2.5000	1.473e-04	1.473e-04
12	0.25	10	1e+17	7e+13					-0.05	-2.5	0.0101	-0.8163	1.470e-05	87.911	1.092e-05	0.0000	3.044e-16	3.044e-16	-2.5000	1.470e-05	1.470e-05
13									-1.0	-2.5	0.0101	-1.0985	1.460e-04	85.738	1.041e-04	0.0000	1.339e-15	1.339e-15	-2.5000	1.460e-04	1.460e-04
14						20	5	0.25	-0.05	-2.5	0.0101	-0.8217	1.460e-05	87.943	1.086e-05	0.0000	2.767e-16	2.767e-16	-2.5000	1.460e-05	1.460e-05
15									-1.0	-2.5	0.0101	-1.0755	1.500e-04	85.792	1.054e-04	0.0000	2.062e-15	2.062e-15	-2.5000	1.500e-04	1.500e-04
16									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8122	1.497e-05	87.752	1.112e-05	0.0000	3.586e-16	3.586e-16	-2.5000	1.497e-05	1.497e-05
17						22	5	0.25	-1.0	-2.5	0.0101	-1.0929	1.465e-04	85.681	1.042e-04	0.0000	1.420e-15	1.420e-15	-2.5000	1.465e-04	1.465e-04
18									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8203	1.463e-05	87.870	1.088e-05	0.0000	2.872e-16	2.872e-16	-2.5000	1.463e-05	1.463e-05
19									-1.0	-2.5	0.0101	-1.0878	1.476e-04	85.709	1.046e-04	0.0000	1.586e-15	1.586e-15	-2.5000	1.476e-04	1.476e-04
20									-0.05	-2.5	0.0101	-0.8178	1.474e-05	87.834	1.095e-05	0.0000	3.049e-16	3.049e-16	-2.5000	1.474e-05	1.474e-05
21						18	5	0.25	-1.0	-2.5	0.0101	-1.0482	1.549e-04	86.080	1.088e-04	0.0000	3.902e-15	3.902e-15	-2.5000	1.549e-04	1.549e-04
22									-0.05	-2.5	0.0101	-0.7989	1.542e-05	87.542	1.144e-05	0.0000	4.990e-16	4.990e-16	-2.5000	1.542e-05	1.542e-05
23									-1.0	-2.5	0.0101	-1.0841	1.481e-04	85.657	1.047e-04	0.0000	1.666e-15	1.666e-15	-2.5000	1.481e-04	1.481e-04
24						22	5	0.25	-0.05	-2.5	0.0101	-0.8183	1.476e-05	87.754	1.097e-05	0.0000	3.193e-16	3.193e-16	-2.5000	1.476e-05	1.476e-05

미세조정 1회 후 결과는 위와 같다. Vd=-1.0 기준으로 분석 해보면, SD_E = 18 쪽은 I_{on} 은 향상되었으나 I_{off} 도 함께 커지는 모습이 확인된다. 즉, SD_E = 20~22 근방, SD_Dose는 4e+16~6e+16 근처에서 최적화 값이 나타날 것으로 기대된다.

(3) parameter 미세조정 2회 시도

미세조정(2회)	
고정값	추가 split 값
Lg = 0.25	SD_Dose
GOxTime = 10	4.5e+16
NWell = 1e+17	5.0e+16
LDD_Dose = 7e+13	5.5e+16
LDD_E = 7	SD_E
RTA = 5	21
Spacer_Dep = 0.25	22
Vd = -0.05, -1.0	23
Vg = -2.5	

이번에는 미세조정 1회와 고정값은 동일하게 두고, split 값에서 SD_Dose의 경우 중앙값(5e+16)값에 더 가깝게 split 하여 진행했으며, SD_E는 위 예상을 검증하기 위해 21~23 범위로 split 하였다.

Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Spacer_Dep	Vd	Vg	tox	Vtgm	ld	SS	gm	Vg0_actual	loff	lmin	Vglon_actual	lon	lmax		
1							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0823	1.468e-04	85.716	1.045e-04	1.454e-15	1.454e-15	-2.5000	1.469e-04	1.469e-04	
2							22	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8197	1.467e-05	87.885	1.091e-05	0.0000	2.893e-16	2.893e-16	-2.5000	1.467e-05	1.467e-05
3							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0884	1.473e-04	85.661	1.044e-04	0.0000	1.535e-15	1.535e-15	-2.5000	1.473e-04	1.473e-04
4							21	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8183	1.470e-05	87.811	1.092e-05	0.0000	3.044e-16	3.044e-16	-2.5000	1.470e-05	1.470e-05
5							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0858	1.479e-04	85.707	1.046e-04	0.0000	1.647e-15	1.647e-15	-2.5000	1.479e-04	1.479e-04
6							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8169	1.476e-05	87.811	1.097e-05	0.0000	3.129e-16	3.129e-16	-2.5000	1.476e-05	1.476e-05
7							21	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0825	1.483e-04	85.655	1.047e-04	0.0000	1.717e-15	1.717e-15	-2.5000	1.483e-04	1.483e-04
8							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8155	1.476e-05	87.734	1.098e-05	0.0000	3.239e-16	3.239e-16	-2.5000	1.476e-05	1.476e-05
9							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0985	1.460e-05	85.738	1.041e-04	0.0000	1.339e-15	1.339e-15	-2.5000	1.460e-05	1.460e-05
10							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8217	1.460e-05	87.943	1.086e-05	0.0000	2.767e-16	2.767e-16	-2.5000	1.460e-05	1.460e-05
11							22	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0929	1.465e-04	85.681	1.042e-04	0.0000	1.420e-15	1.420e-15	-2.5000	1.465e-04	1.465e-04
12							21	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8203	1.463e-05	87.870	1.088e-05	0.0000	2.872e-16	2.872e-16	-2.5000	1.463e-05	1.463e-05
13							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0914	1.460e-04	85.672	1.043e-04	0.0000	1.470e-15	1.470e-15	-2.5000	1.460e-04	1.460e-04
14							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8194	1.467e-05	87.871	1.091e-05	0.0000	2.821e-16	2.821e-16	-2.5000	1.467e-05	1.467e-05
15							22	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0878	1.474e-04	85.660	1.044e-04	0.0000	1.547e-15	1.547e-15	-2.5000	1.474e-04	1.474e-04
16							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8181	1.469e-05	87.808	1.093e-05	0.0000	3.064e-16	3.064e-16	-2.5000	1.469e-05	1.469e-05
17							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0878	1.476e-04	85.760	1.046e-04	0.0000	1.586e-15	1.586e-15	-2.5000	1.476e-04	1.476e-04
18							22	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8178	1.474e-05	87.834	1.095e-05	0.0000	3.049e-16	3.049e-16	-2.5000	1.474e-05	1.474e-05
19							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0841	1.481e-04	85.657	1.047e-04	0.0000	1.666e-15	1.666e-15	-2.5000	1.481e-04	1.481e-04
20							21	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8163	1.476e-05	87.754	1.097e-05	0.0000	3.193e-16	3.193e-16	-2.5000	1.476e-05	1.476e-05
21	0.25	10	1e+17	7e+13	6e+16	7	20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0805	1.488e-04	85.707	1.049e-04	0.0000	1.824e-15	1.824e-15	-2.5000	1.488e-04	1.488e-04
22							22	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8144	1.484e-05	87.749	1.103e-05	0.0000	3.349e-16	3.349e-16	-2.5000	1.484e-05	1.484e-05
23							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0771	1.493e-04	85.655	1.050e-04	0.0000	1.913e-15	1.913e-15	-2.5000	1.493e-04	1.493e-04
24							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8130	1.486e-05	87.665	1.104e-05	0.0000	3.376e-16	3.376e-16	-2.5000	1.486e-05	1.486e-05
25							22	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0944	1.464e-04	85.726	1.042e-04	0.0000	1.394e-15	1.394e-15	-2.5000	1.464e-04	1.464e-04
26							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8207	1.464e-05	87.912	1.088e-05	0.0000	2.825e-16	2.825e-16	-2.5000	1.464e-05	1.464e-05
27							21	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0906	1.492e-04	85.689	1.043e-04	0.0000	1.47e-15	1.47e-15	-2.5000	1.492e-04	1.492e-04
28							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8193	1.466e-05	87.840	1.090e-05	0.0000	2.960e-16	2.960e-16	-2.5000	1.466e-05	1.466e-05
29							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0885	1.474e-04	85.707	1.045e-04	0.0000	1.580e-15	1.580e-15	-2.5000	1.474e-04	1.474e-04
30							21	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8182	1.472e-05	87.843	1.094e-05	0.0000	3.043e-16	3.043e-16	-2.5000	1.472e-05	1.472e-05
31							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0851	1.476e-04	85.657	1.046e-04	0.0000	1.629e-15	1.629e-15	-2.5000	1.476e-04	1.476e-04
32							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8168	1.474e-05	87.770	1.095e-05	0.0000	3.158e-16	3.158e-16	-2.5000	1.474e-05	1.474e-05
33							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0900	1.472e-04	85.710	1.045e-04	0.0000	1.518e-15	1.518e-15	-2.5000	1.472e-04	1.472e-04
34							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8168	1.471e-05	87.859	1.093e-05	0.0000	2.969e-16	2.969e-16	-2.5000	1.471e-05	1.471e-05
35							21	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0862	1.477e-04	85.658	1.045e-04	0.0000	1.599e-15	1.599e-15	-2.5000	1.477e-04	1.477e-04
36							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8173	1.479e-05	87.782	1.095e-05	0.0000	3.122e-16	3.122e-16	-2.5000	1.479e-05	1.479e-05
37							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0837	1.483e-04	85.707	1.046e-04	0.0000	1.730e-15	1.730e-15	-2.5000	1.483e-04	1.483e-04
38							21	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8157	1.480e-05	87.779	1.100e-05	0.0000	2.239e-16	2.239e-16	-2.5000	1.480e-05	1.480e-05
39							23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-1.0798	1.486e-04	85.653	1.043e-04	0.0000	1.811e-15	1.811e-15	-2.5000	1.486e-04	1.486e-04
40							20	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8143	1.482e-05	87.699	1.101e-05	0.0000	3.307e-16	3.307e-16	-2.5000	1.482e-05	1.482e-05

미세조정 1에서 진행한 값과 정확히 비교하기 위해 parameter를 delete 하지 않고 진행하여 많은 추출값이 나왔다. 결과값을 분석해보면, SD_E는 23 쪽이 제일 최적화된 경향을 보였다. 또한 SD_Dose는 커질수록 I_{on}은 조금씩 오르지만, I_{off}도 같이 올라간다. 따라서 최대 I_{on}만 보면 6e16 / 23 조합이 우세하며, 균형까지 고려하면 4e+16~5e+16 / 22~23 근방이 더 최적화 된 값이라고 할 수 있다.

(3) parameter 미세조정 3회 시도

고정값		미세조정(3회)		추가 split 값	
Lg = 0.25		SD_Dose			
GOxTime = 10		3.8e+16			
NWell = 1e+17		4.2e+16			
LDD_Dose = 7e+13		4.6e+16			
LDD_E = 7		SD_E			
RTA = 5		22			
Spacer_Dep = 0.25		22.5			
Vd = -0.05, -1.0		23			
Vg = -2.5					

이전 미세조정에서 SD_E = 22~23 구간이 가장 우수했고, SD_Dose는 증가할수록 I_{on}은 커졌지만 I_{off}도 함께 증가하였다. 따라서 마지막 단계에서는 SD_Dose를 4e+16 근처에서 세분화하고, SD_E도 22~23 keV 사이를 미세 분할하여 I_{on} 증가 대비 leakage 증가가 가장 작은 지점을 찾는 것을 목표로 하였다.

	1	Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Spacer_Dep	Vd	Vg	tox	Vtgm	ld	SS	gm	Vg0_actual	loff	lmin	Vglon_actual	lon	lmax	
1											-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.8203	1.465e-04	85.681	1.045e-04	0.0000	1.420e-15	1.420e-15	-2.5000	1.465e-04	1.465e-04
2								22	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8203	1.463e-05	87.670	1.060e-05	0.0000	2.872e-16	2.872e-16	-2.5000	1.463e-05	1.463e-05
3								23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0876	1.474e-04	85.660	1.044e-04	0.0000	1.547e-15	1.547e-15	-2.5000	1.474e-04	1.474e-04
4								22	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8181	1.469e-05	87.808	1.033e-05	0.0000	3.064e-16	3.064e-16	-2.5000	1.469e-05	1.469e-05
5								23.5	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.1905	1.469e-04	85.668	1.043e-04	0.0000	1.479e-15	1.479e-15	-2.5000	1.469e-04	1.469e-04
6								22.5	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8193	1.466e-05	87.839	1.039e-05	0.0000	2.966e-16	2.966e-16	-2.5000	1.466e-05	1.466e-05
7								22	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.1905	1.469e-05	85.665	1.043e-05	0.0000	1.477e-15	1.477e-15	-2.5000	1.469e-05	1.469e-05
8								22	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8193	1.466e-05	87.840	1.050e-05	0.0000	2.966e-16	2.966e-16	-2.5000	1.466e-05	1.466e-05
9								4.5e+16	7		-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0851	1.476e-04	85.657	1.046e-04	0.0000	1.629e-15	1.629e-15	-2.5000	1.476e-04	1.476e-04
10								23	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8168	1.474e-05	87.770	1.055e-05	0.0000	3.158e-16	3.158e-16	-2.5000	1.474e-05	1.474e-05
11								22.5	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0880	1.474e-04	85.660	1.044e-04	0.0000	1.546e-15	1.546e-15	-2.5000	1.474e-04	1.474e-04
12								23	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8181	1.479e-05	85.695	1.053e-05	0.0000	3.060e-16	3.060e-16	-2.5000	1.479e-05	1.479e-05
13								23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0865	1.477e-04	85.704	1.046e-04	0.0000	1.619e-15	1.619e-15	-2.5000	1.477e-04	1.477e-04
14								23	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8173	1.473e-05	87.821	1.056e-05	0.0000	3.100e-16	3.100e-16	-2.5000	1.473e-05	1.473e-05
15	0.25	10	1e+17	7e+13	3.8e+16	7	23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0880	1.472e-04	85.663	1.044e-04	0.0000	1.517e-16	1.517e-16	-2.5000	1.472e-04	1.472e-04	
16								22	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8186	1.469e-05	87.821	1.032e-05	0.0000	3.023e-16	3.023e-16	-2.5000	1.468e-05	1.468e-05
17								22.5	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.1915	1.467e-04	85.673	1.042e-04	0.0000	1.454e-15	1.454e-15	-2.5000	1.467e-04	1.467e-04
18								23	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8193	1.464e-05	87.853	1.039e-05	0.0000	2.967e-16	2.967e-16	-2.5000	1.464e-05	1.464e-05
19								22	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0920	1.467e-04	85.675	1.042e-04	0.0000	1.443e-15	1.443e-15	-2.5000	1.467e-04	1.467e-04
20								22.5	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8199	1.464e-05	87.858	1.039e-05	0.0000	2.908e-16	2.908e-16	-2.5000	1.464e-05	1.464e-05
21								23	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0867	1.476e-04	85.658	1.045e-04	0.0000	1.579e-15	1.579e-15	-2.5000	1.476e-04	1.476e-04
22								23	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8176	1.471e-05	87.791	1.054e-05	0.0000	3.103e-16	3.103e-16	-2.5000	1.471e-05	1.471e-05
23								22.5	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0984	1.471e-04	85.664	1.044e-04	0.0000	1.505e-15	1.505e-15	-2.5000	1.471e-04	1.471e-04
24								23	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8188	1.467e-05	87.828	1.051e-05	0.0000	3.004e-16	3.004e-16	-2.5000	1.467e-05	1.467e-05
25								22	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0902	1.470e-04	85.667	1.043e-04	0.0000	1.488e-15	1.488e-15	-2.5000	1.470e-04	1.470e-04
26								23	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8191	1.467e-05	87.834	1.051e-05	0.0000	2.977e-16	2.977e-16	-2.5000	1.467e-05	1.467e-05
27								22	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0846	1.479e-04	85.656	1.046e-04	0.0000	1.646e-15	1.646e-15	-2.5000	1.479e-04	1.479e-04
28								23	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8165	1.474e-05	87.762	1.056e-05	0.0000	3.175e-16	3.175e-16	-2.5000	1.474e-05	1.474e-05
29								22.5	5	0.25	-1.0	-2.5	--	0.0101	-0.0875	1.474e-04	85.655	1.045e-04	0.0000	1.586e-15	1.586e-15	-2.5000	1.474e-04	1.474e-04
30								22.5	5	0.25	-0.05	-2.5	--	0.0101	-0.8173	1.470e-05	87.809	1.053e-05	0.0000	3.078e-16	3.078e-16	-2.5000	1.470e-05	1.470e-05

마지막 미세조정 결과값을 통해 효율이 감소한 조건들은 제거하고, 최종적으로 두 개의 후보를 비교해 볼 수 있다.

기준점	
SD_Dose = 4e+16, SD_E = 23	$I_{on} = 1.474e-04$ $I_{off} = 1.547e-15$ SS = 85.660
후보 1	
SD_Dose = 4.5e+16, SD_E = 23	$I_{on} = 1.478e-04$ $I_{off} = 1.629e-15$ SS = 85.657
후보 2	
SD_Dose = 5.5e+16, SD_E = 23	$I_{on} = 1.480e-04$ $I_{off} = 1.811e-15$ SS = 85.653

두 조건값의 향상률을 비교하면 다음과 같다.

SD_Dose = 4.5e+16, SD_E = 23		I_{on} 은 아주 조금 증가 (+0.004e-04, 약 +0.27%) I_{off} 는 더 커짐 ($1.547e-15 \rightarrow 1.629e-15$, 약 +5.3%) SS는 사실상 거의 동일
분석	얻는 I_{on} 이득은 약 0.27% 로 적으나, I_{off} 손해는 약 5.3%로 너무 크다.	
SD_Dose = 5.5e+16, SD_E = 23		I_{on} 은 기준 후보보다 조금 더 큼 (+0.41% 수준) I_{off} 는 꽤 커짐 (+17% 정도) SS는 여전히 거의 차이 없음
분석	얻는 I_{on} 이득은 약 0.41%로 후보 1보다 0.14%만큼 더 효율이 좋으나, I_{off} 손해가 약 17%로 후보 1에 비해 11.7% 만큼 비효율적이다.	

물리적으로 보면 SD 조건은 주로 source/drain 직렬저항을 줄여서 I_{on} 을 올리는 역할을 한다. 그러나 일정값 이상 증가 시, 직렬저항 감소 효과는 포화되고 대신 접합이 더 강해지면서 I_{off} 가 커지고 경우에 따라 SS도 조금씩 악화될 수 있다. 이로 인해

4e+16 → 4.5e+16 → 5.5e+16 로 SD_Dose 가 증가할수록

I_{on} 증가폭은 점점 작아지고 I_{off} 증가폭은 누적되는 경향성을 관찰할 수 있었다.

I_{on} 만 보면 더 높은 SD_Dose 조건이 유리할 수 있으나, I_{on} 증가폭은 0.3~0.4% 수준으로 매우 작았다. 반면 I_{off} 는 5~17% 증가하여 leakage 손실이 상대적으로 더 컸다. 따라서 본 과제에서는 단순히 I_{on} 최대 조건이 아니라, I_{on} 증가 대비 I_{off} 손실이 가장 작은 조건을 최적 조건으로 판단하였다.

결론적으로 후보 1인 SD_Dose = 4.5e+16, SD_E = 23 조건은 기준점보다 I_{on} 이 약 0.27% 증가하였으나, I_{off} 는 약 5.3% 증가하였다. 후보 2인 SD_Dose = 5.5e+16, SD_E = 23 조건은 I_{on} 이 약 0.41% 증가하였지만, I_{off} 는 약 17% 증가하였다. 따라서 SD_Dose를 더 높였을 때 얻는 I_{on} 증가폭은 작고, leakage 증가폭은 상대적으로 크므로 초기 기준점인 SD_Dose = 4e+16, SD_E = 23을 최종 조건으로 선택하였다.

또한, SD_E의 경우 22.5 로도 split 해보았으나, 결국 23으로 수렴할 때 I_{on} 이 더 잘나오고 SS 나 I_{off} 가 크게 손상되지 않는 것을 확인 했다. 따라서 SD_E는 23으로 유지하기로 하였다.

▶ 결론(최종 단일 최적값 선택)

최종 조건은 단순히 I_{on} 이 가장 큰 조건이 아니라, I_{on} , I_{off} , SS, V_{tgm} 을 함께 고려하여 선택하였다. 모든 target을 만족하는 조건들 중에서 I_{on} 은 충분히 크게 유지하면서, I_{off} 증가폭이 가장 작고 SS가 안정적인 조건을 최종 최적 조건으로 선정하였다.

따라서 최종적으로 다음과 같은 소자 값이 최적의 pMOSFET 소자임을 확인 할 수 있었다.

	Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Spacer_Dep	Vd	Vg	tox	Vtgm	Id	SS	gm	Vg0_actual	Ioff	Imin	Vgion_actual	Ion	Imax
1	0.25	10	1e+17	7e+13	4e+16	7	23	5	0.25	-1.0	-2.5	0.0101	-1.0878	1.474e-04	85.660	1.044e-04	0.0000	1.547e-15	1.547e-15	-2.5000	1.474e-04	1.474e-04
2										-0.05	-2.5	0.0101	-0.8181	1.469e-05	87.806	1.093e-05	0.0000	3.064e-16	3.064e-16	-2.5000	1.469e-05	1.469e-05

최적의 pMOS 소자									
Vg=-2.5	Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Spacer_Dep
입력값	0.25	10	1e+17	7e+13	4e+16	7	23	5	0.25
Vd	V _{tgm}	SS	gm	Vg0_actual	I _{off} (=I _{min})	VgI _{on} _actual	I _{on} (=I _{max})		
-1.0	-1.0878	85.660	1.044e-04	0	1.547e-15	-2.5	1.474e-04		
-0.05	-0.8181	87.806	1.093e-05	0	3.064e-16	-2.5	1.469e-05		

결과값이 Target 범위를 만족하는지 최종검토

항목	Target	최종결과	만족여부
I_{on}	> 1e-5 A/um	1.474e-04	O
SS	< 100	85.660	O
I_{off}	< 1e-14 A/um	1.547e-15	O
V_{tgm}	PMOS	-1.0878	O

5-2. (방법2) I_{on}/I_{off} -SS 그래프로 비교

- 각 split 이유와 parameter 변화로 인한 특성 변화 예측은 5-1에서 많은 설명이 되어있기에, 가독의 편리함을 위해 몇몇 설명을 단축시켰다.

▶ Baseline 설정 및 pMOS 정상구동 확인

- 5-1에서 진행한것과 동일하여 생략하였다.

▶ LDD 조건 최적화

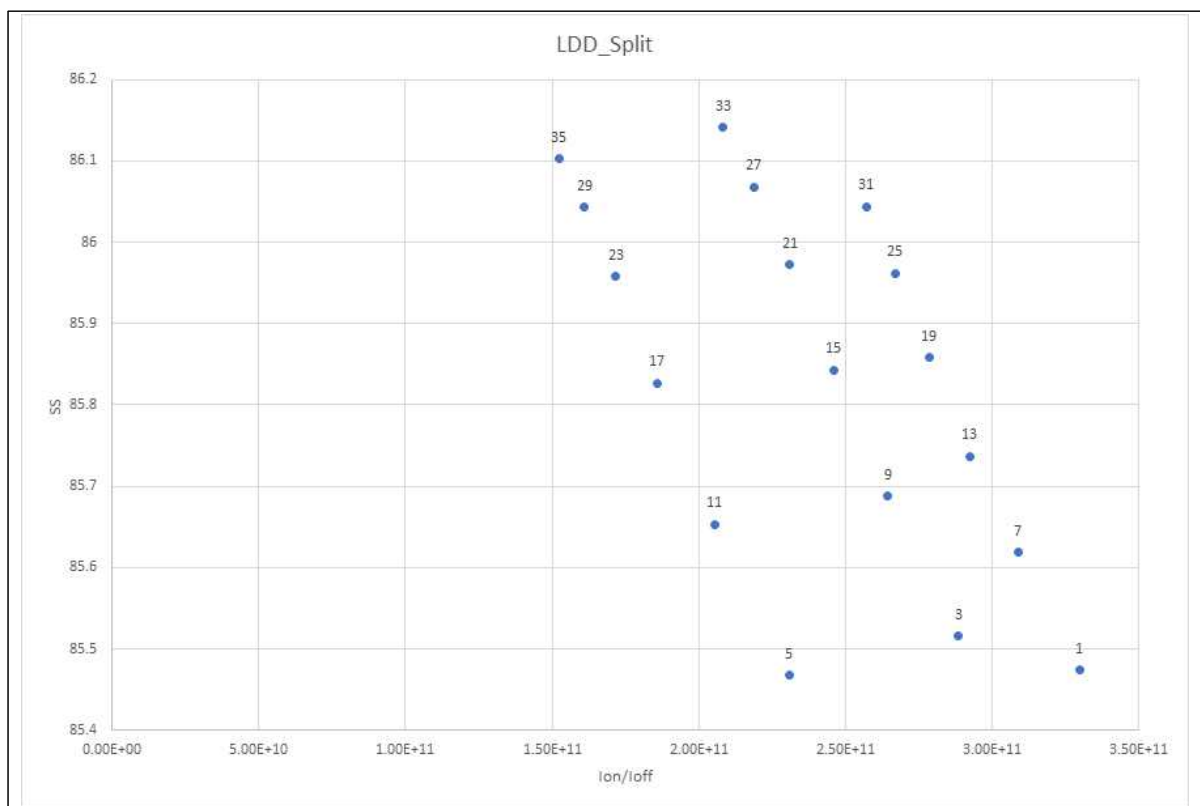
- 처음으로 split 할 수치는 다음과 같다.

고정값
Lg = 0.25
GOxTime = 10
NWell = 1e17
SD_Dose = 1e16
SD_E = 15
RTA = 5
Spacer_Dep = 0.30
Vg = -2.5
Vd = -0.05, -1.0
LDD_Dose Split
3e+13
4e+13
5e+13
6e+13

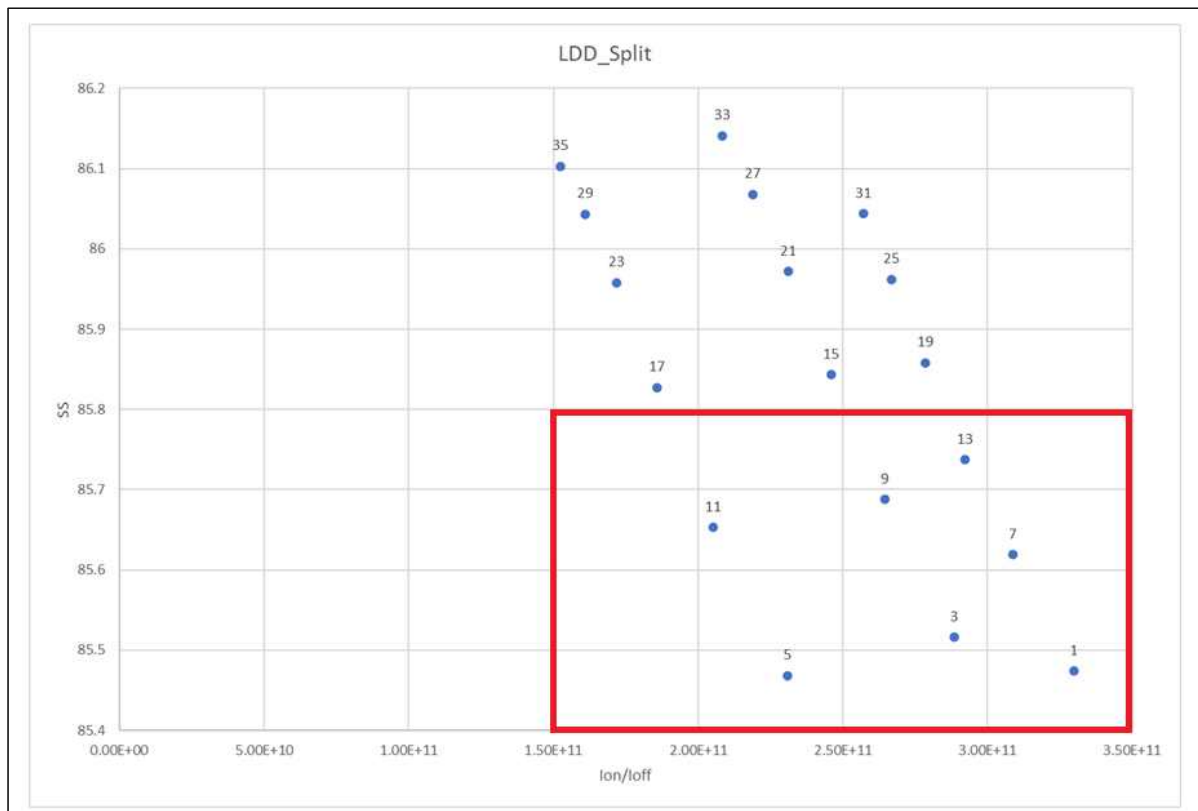
7e+13
8e+13
LDD_E Split
3
5
7

	LDD_E	SD_Dose	SD_E	RTA	Spacer_Dep		Vg	Vd
1	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
2	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
3	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
4	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
5	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
6	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
7	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
8	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
9	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
10	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
11	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
12	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
13	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
14	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
15	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
16	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
17	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
18	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
19	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
20	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
21	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
22	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
23	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
24	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
25	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
26	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
27	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
28	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
29	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
30	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
31	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
32	3	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
33	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
34	5	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05
35	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-1.0
36	7	1e+16	15	5	0.30	--	-2.5	-0.05

- TACD의 결과값을 기반으로 I_{on}/I_{off} -SS 그래프를 제작하면 다음과 같다. (명확한 비교를 위해 $v_d=-0.05$ 는 포함시키지 않았다.)



- 위와 같은 그래프에서, 가장 오른쪽 아래에 배치되어있는 data 들만 사용하려고 한다. (각 번호는 노드 셀의 번호이다.)



- 그래프 상 위치의 상대적 우수성으로 판단하면, LDD Split에서 사용할 수 있는 유의미한 data 는 (LDD_Dose/LDD_E) 1번($3e+13/3$), 3번($3e+13/5$), 7번($4e+13/3$), 13번($5e+13/3$), 9번($4e+13/5$), 11 번($4e+13/7$), 5번($3e+13/7$) 조건이다.
- LDD Split 결과를 I_{on}/I_{off} -SS 그래프로 분석한 결과, 단순히 LDD_Dose가 큰 조건이 항상 우수한 것은 아님을 확인하였다. 낮은 LDD_Dose 조건에서는 I_{on} 이 다소 감소할 수 있으나, I_{off} 가 더 효과 적으로 억제되어 I_{on}/I_{off} 가 증가하고 SS도 낮게 유지되는 경향을 보였다. 따라서 그래프상 I_{on}/I_{off} 가 크고 SS가 낮은 오른쪽 아래 영역에 위치한 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13번 조건을 시간 효율을 고려 해 그래프상 가장 우수한 위치에 있는 1, 3, 5, 7번 조건만을 LDD 후보로 선정하고, 해당 조건들 을 기반으로 다음 SD Split을 진행하였다.

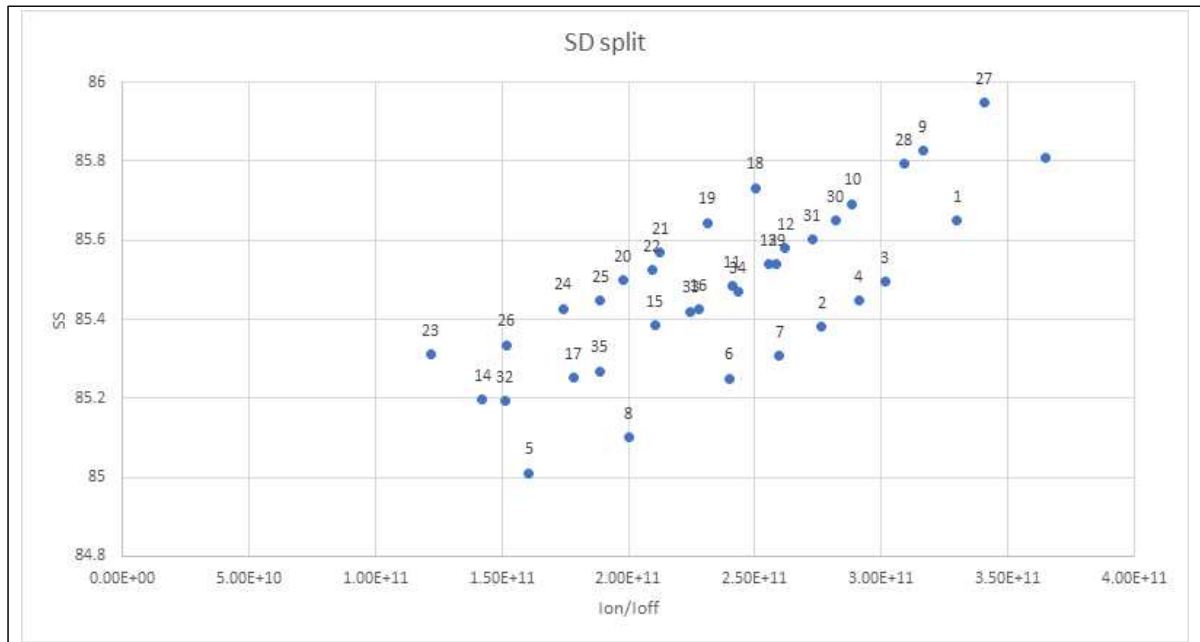
► Source/Drain 조건 최적화

SD_Dose Split	
	1e+16
	3e+16
	5e+16
SD_E	
	10
	15
	20

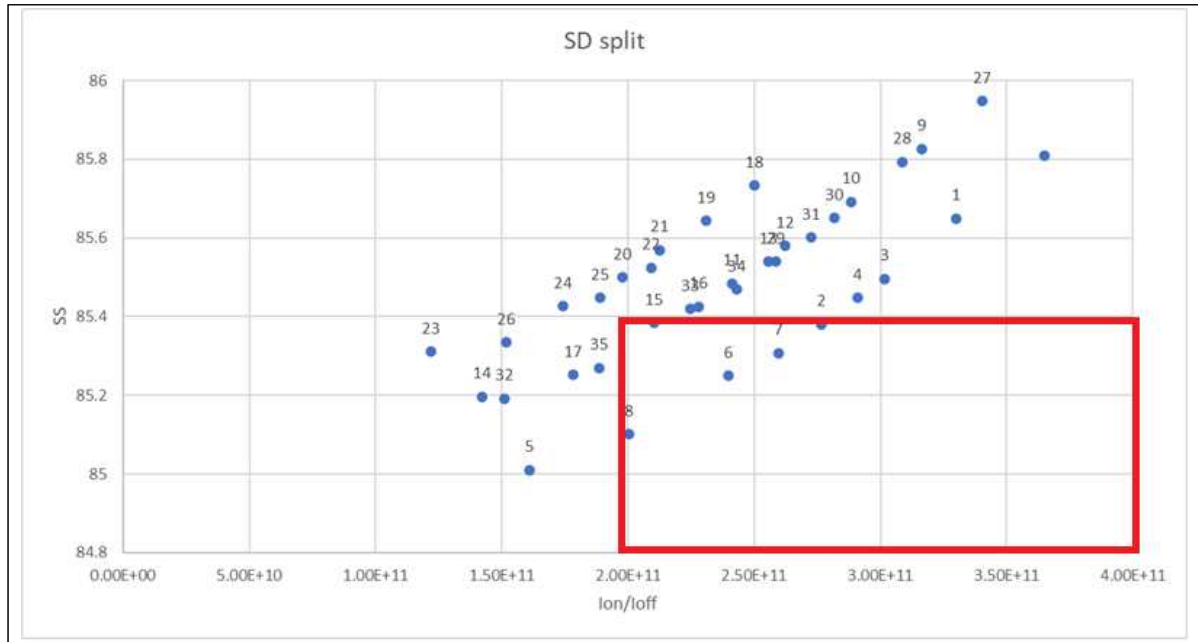
--

		Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	LDD_E	SD_Dose	SD_E	RTA	Spacer_Dep		Vg	Vd
1													
2							1e+16	10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
3								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
4								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
5							3e+16	10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
6								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
7								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
8								10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
9								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
10								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
11								10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
12								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
13								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
14							5e+16	10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
15								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
16								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
17								10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
18								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
19								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
20								10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
21								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
22								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
23								10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
24								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
25								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
26								10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
27								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
28								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
29								10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
30								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
31								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
32								10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
33								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
34								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0
35								10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
36								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
								20	5	0.3	--	-2.5	-1.0

- 위 값들을 통해 나온 결과값을 그래프로 분산시켜보면 다음과 같다.



- 이 중 유지할 Data를 표시하면 다음과 같다.



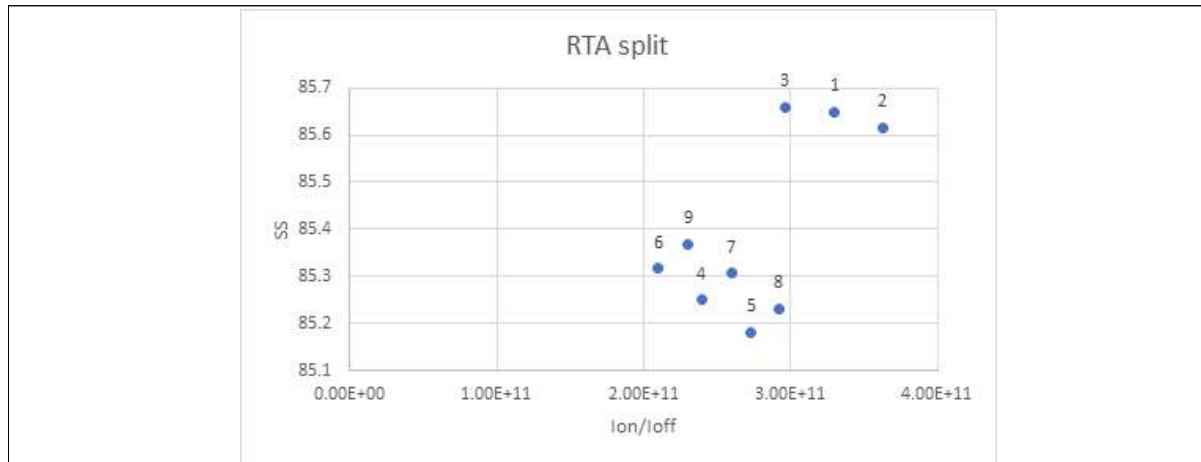
- 그래프상 우수성을 기준으로 판단하면 (LDD_Dose/LDD_E/SDD_Dose/SDD_E) 8번(3e+13/3/5e+16/15), 6번(3e+13/3/3e+16/20), 7번(3e+13/3/5e+16/10), 2번(3e+13/3/1e+16/15)가 가장 우수한 경향성을 보임을 알 수 있다. 이를 기준으로 고정한 뒤, RTA를 조정하여 다음 값을 확인하려고 한다.
- SD_Dose가 증가하면 p+ source/drain 영역의 저항이 감소하여 I_{on} 이 향상되지만, 과도한 도핑은 junction 전기장을 증가시켜 I_{off} 및 SS 악화를 유발할 수 있다. 또한 SD_E는 junction depth와 lateral diffusion에 영향을 주므로, 너무 낮은 energy는 직렬저항 증가를, 너무 높은 energy는 leakage 증가를 초래할 수 있다. 선택된 조건들은 이러한 상반된 효과 사이에서 I_{on}/I_{off} 를 높게 유지하면서 SS를 낮게 유지한 조합이다.

▶ RTA 조건 변화

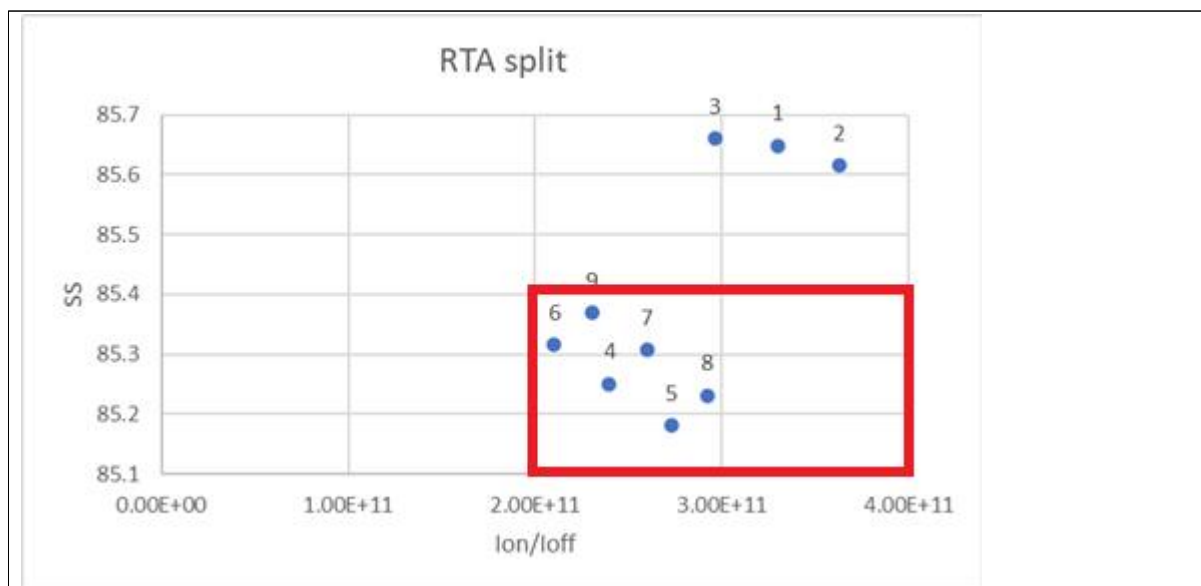
- RTA는 다음과 같이 split 하였다.

RTA split													
3													
5													
7													
		Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	LDD_E	SD_Dose	SD_E	RTA	Spacer_Dep		Vg	Vd
1	--	0.25	10	1e+17	3e+13	3	1e+16	15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
2									3	0.3	--	-2.5	-1.0
3									7	0.3	--	-2.5	-1.0
4							5e+16	10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
5									3	0.3	--	-2.5	-1.0
6									7	0.3	--	-2.5	-1.0
7								15	5	0.3	--	-2.5	-1.0
8									3	0.3	--	-2.5	-1.0
9									7	0.3	--	-2.5	-1.0

- 이를 통해 나온 결과를 그래프로 분산 시켜보았다.



- 해당 값들의 영역을 나누면 다음과 같다.



- 범위 내에 들어온 점들을 확인하여, 우리가 가져갈 변수 조건은 왼쪽에서부터 (SD_Dose/SD_E/RTA) 6번, 9번, 4번, 7번, 5번, 8번이다. 해당 값들은 SD_Dose 는 $5e+16$ 에서, SD_E는 10과 15에서, RTA는 5,3,7 모두 좋은 효율을 나왔길래 해당 6개의 변수값을 가지고 다음 추가 split 으로 넘어가려고한다.
- 이 split을 통해 알 수 있는 것은, RTA시간보다 SD_Dose와 SD_E의 조합이 소자 성능에 더 큰 영향을 미친다는 것이다. SD_Dose가 낮은 조건, 예를 들어 $1e+16$ 또는 $3e+16$ 에서는 source/drain의 p+ 도핑 농도가 상대적으로 부족해서 직렬저항이 커질 수 있다. 이 경우 RTA로 dopant activation을 증가시켜도 기본적인 도핑 농도 자체가 낮기 때문에 I_{on} 향상에 한계가 생긴다. 따라서 RTA를 조절하더라도 I_{on}/I_{off} 가 크게 개선되지 못하고, 우수 영역에 들어오지 못한 것으로 볼 수 있다.
- 반대로 SD_E가 너무 큰 조건, 특히 SD_E = 20에서는 dopant가 더 깊게 주입되어 source/drain 저항 감소에는 도움이 될 수 있지만, junction depth와 lateral diffusion이 증가하면서 drain 쪽 전기장 및 leakage가 커질 가능성이 있다. 이 경우 RTA 시간이 증가하면 dopant activation뿐 아니라 diffusion도 함께 증가하므로, I_{off} 증가나 SS 악화가 나타날 수 있다. 따라서 높은 energy 조건은 RTA와 결합했을 때 오히려 gate 제어성을 떨어뜨려 그래프상 위쪽, 즉 SS가 큰 영역으로 이동한 것으로 해석할 수 있다.
- 즉, RTA는 dopant activation을 통해 I_{on} 을 개선할 수 있지만, 이미 SD_Dose와 SD_E 조합이 불

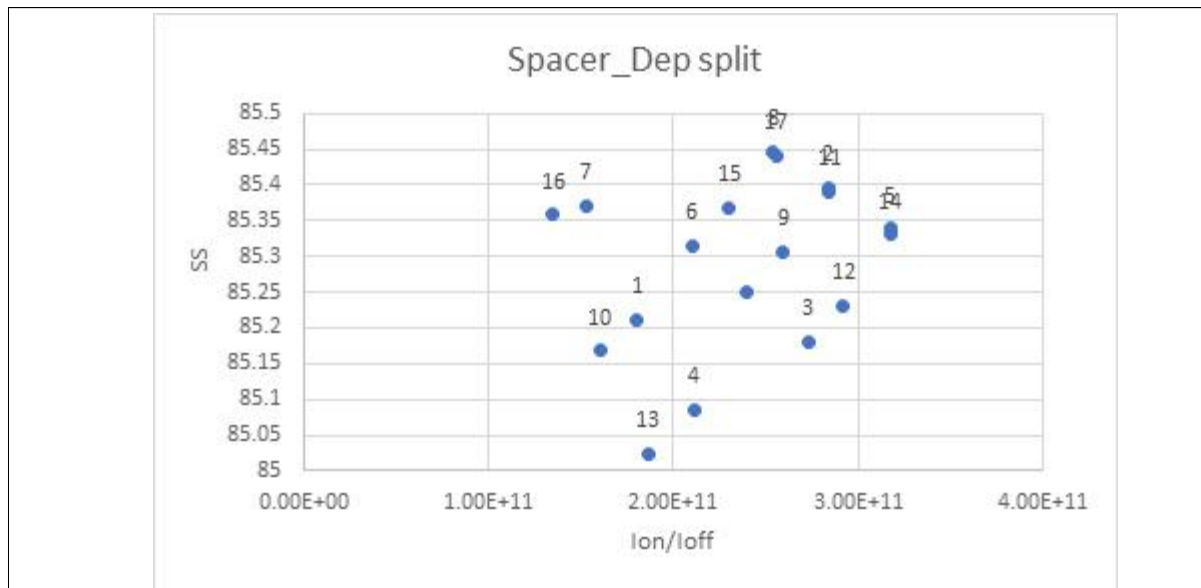
리한 경우에는 그 한계를 보완하지 못한다. 특히 이번 결과에서는 RTA를 3, 5, 7로 바꾸는 것보다, SD_Dose를 5e16으로 높이고 SD_E를 10~15로 제한하는 것이 I_{on}/I_{off} -SS 특성에 더 큰 영향을 준 것으로 판단된다.

► Spacer 조건 변화

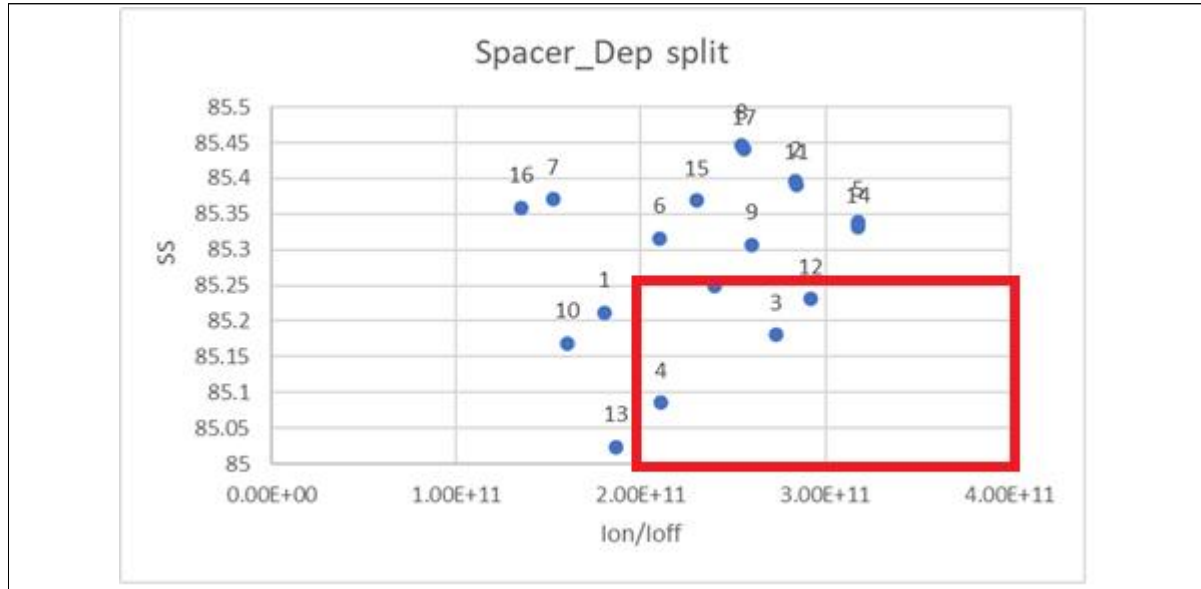
- spacer 변수 변경 조건에 대한 자세한 이유 및 설명은 5-1에서 진행하여 생략한다.
- Spacer_Dep split 은 다음과 같다.

Spacer_Dep Split													
0.25													
0.3													
0.35													
		Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	LDD_E	SD_Dose	SD_E	RTA	Spacer_Dep		Vg	Vd
1	--	0.25	10	1e+17	3e+13	3	5e+16	10	5	0.3	--	-2.5	-1.0
2										0.25	--	-2.5	-1.0
3										0.35	--	-2.5	-1.0
4										0.3	--	-2.5	-1.0
5									3	0.25	--	-2.5	-1.0
6										0.35	--	-2.5	-1.0
7										0.3	--	-2.5	-1.0
8									7	0.25	--	-2.5	-1.0
9										0.35	--	-2.5	-1.0
10										0.3	--	-2.5	-1.0
11								15	5	0.25	--	-2.5	-1.0
12										0.35	--	-2.5	-1.0
13										0.3	--	-2.5	-1.0
14									3	0.25	--	-2.5	-1.0
15										0.35	--	-2.5	-1.0
16										0.3	--	-2.5	-1.0
17									7	0.25	--	-2.5	-1.0
18										0.35	--	-2.5	-1.0

- 나온 결과값을 그래프로 분산 시켰다.



- 영역을 나누어 값을 선택하면 다음과 같다.



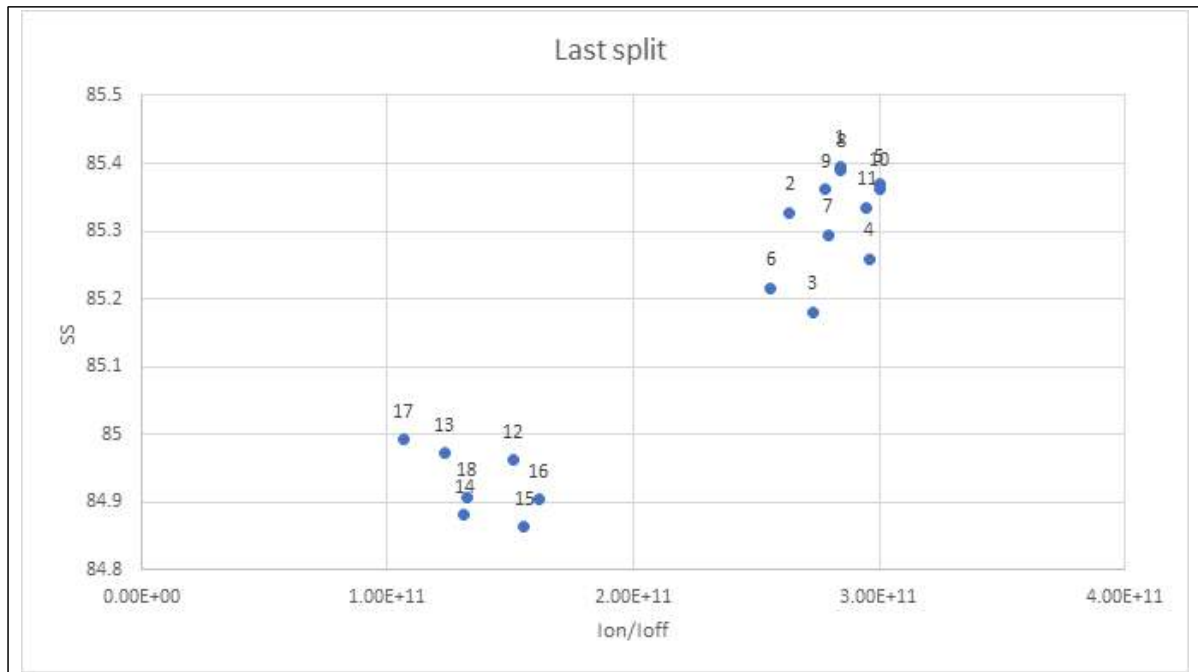
- 그래프 위치 우수성을 기준으로 판단하면, (SD_E/RTA/Spacer_Dep) 4번(10/3/0.3), 3번(10/5/0.35), 12번(15/5/0.35) 조건만이 범위 내에 들어온 것을 볼 수 있다. Spacer_Dep는 gate와 source/drain 영역 사이의 거리를 조절하므로, 너무 얇은 spacer는 source/drain이 gate에 가까워져 전기장 증가와 leakage 증가를 유발할 수 있고, 너무 두꺼운 spacer는 직렬저항을 증가시켜 I_{on} 감소를 유발할 수 있다. 이번 결과에서는 $Spacer_Dep = 0.30 \sim 0.35$ 조건이 상대적으로 우수한 I_{on}/I_{off} -SS trade-off를 보였으며, 이는 해당 범위에서 leakage 억제와 직렬저항 증가 사이의 균형이 적절하게 형성되었기 때문으로 판단된다. 다만 그래프상 특정 조건이 압도적으로 우세하지는 않았기 때문에, 선택된 3개 후보를 기준으로 후속 미세 split을 진행하였다.

▶ 최종 parameter 미세조정 후 단일 최적값 선택

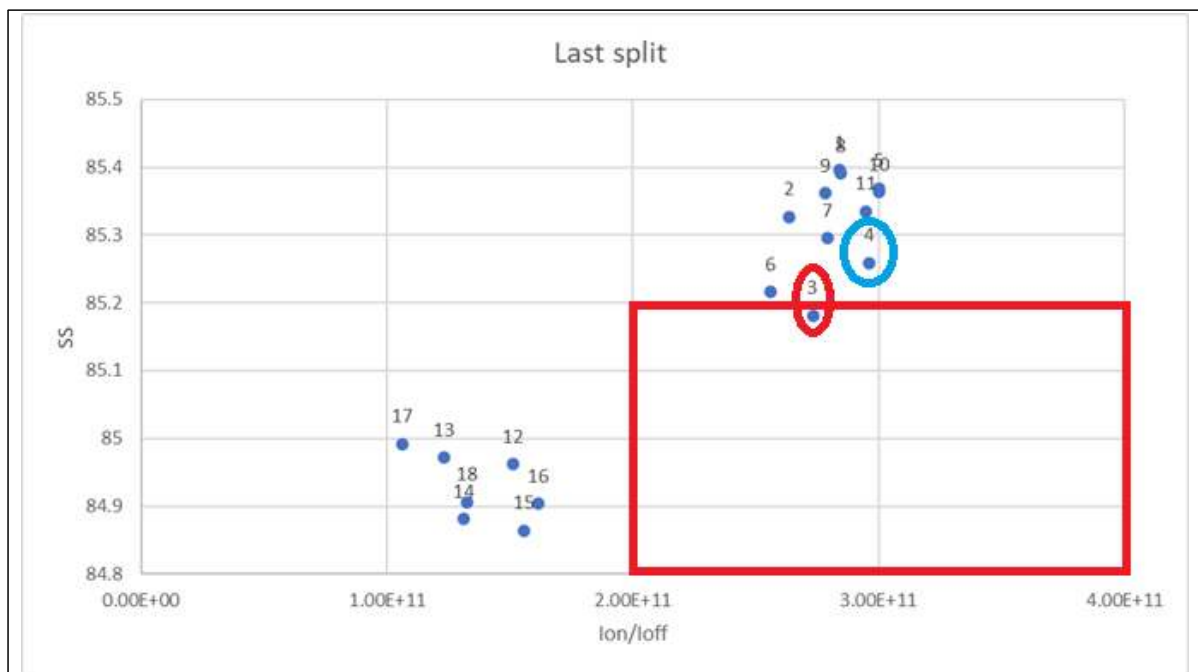
(1) parameter 미세조정 1회 시도

SD_E Split														
12.5														
RTA Split														
4														
Spacer_Dep Split														
0.325														
		Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	LDD_E	SD_Dose	SD_E	RTA	Spacer_Dep		Vg	Vd	
1	--	0.25	10	1e+17	3e+13	3	5e+16	10	5	0.35	--	-2.5	-1.0	
2										0.325	--	-2.5	-1.0	
3										0.3	--	-2.5	-1.0	
4									3	0.325	--	-2.5	-1.0	
5										4	0.35	--	-2.5	-1.0
6											0.3	--	-2.5	-1.0
7									0.325		--	-2.5	-1.0	
8								15	5	0.35	--	-2.5	-1.0	
9										0.325	--	-2.5	-1.0	
10										4	0.35	--	-2.5	-1.0
11									0.325		--	-2.5	-1.0	
12									5		0.35	--	-2.5	-1.0
13										0.325	--	-2.5	-1.0	
14										3	0.3	--	-2.5	-1.0
15									12.5		0.325	--	-2.5	-1.0
16											4	0.35	--	-2.5
17										0.3		--	-2.5	-1.0
18										0.325		--	-2.5	-1.0

- 해당 결과를 사용해 그래프를 분산시키면 다음과 같다.



- 해당 그래프의 영역을 나누면 다음과 같다.



- 이번 split 결과로 조건들이 크게 두 구역으로 나누어졌다.

왼쪽 아래 그룹: SS는 매우 낮지만 Ion/Ioff가 낮음
 오른쪽 위쪽 그룹: Ion/Ioff는 높지만 SS가 약간 높음

- 해당 구역들을 고려하여, 영역 내 위치상 우수한 조건을 선택하려한다. 최종 split 결과에서 3번과 4번 조건은 모두 높은 I_{on}/I_{off} 와 낮은 SS를 보이는 우수 후보로 나타났다. 4번 조건은 3번보다 I_{on}/I_{off} 가 다소 높고 I_{off} 가 낮았으나, SS가 상대적으로 증가하고 I_{on} 이 소폭 감소하였다. 반면 3번 조건은 I_{on}/I_{off} 가 충분히 높은 수준을 유지하면서도 SS가 더 낮고 I_{on} 이 더 크게 나타나, on/off 전류비와 gate 제어성 사이의 균형이 더 우수한 조건으로 판단하였다. 그렇기에 4번과 3번 모두 최적화의 기준에 따라 선택될 수 있는 조건이다.

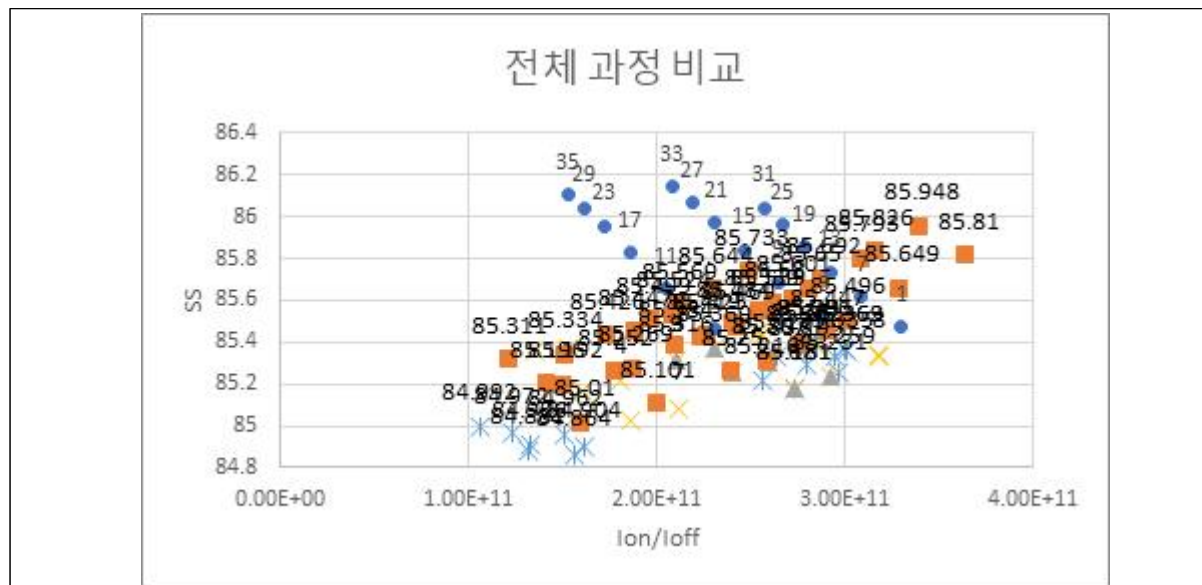
- 그러나 해당 과정에서는 최종 소자 선정 기준을 단순한 I_{on}/I_{off} 최대값이 아니라, I_{on}/I_{off} 가 충분히 크면서 SS가 낮은 오른쪽 아래 영역에 들어오는가를 기준으로 설정하였다. 이 기준에서 3번 조건은 $SS \leq 85.2$ 영역에 포함되는 유효 후보이며, 유일하게 영역 내에 포함되는 점이다. 동시에 높은 I_{on} 과 안정적인 I_{off} 를 나타내므로 제한된 split 범위 내 최적 조건으로 선정하였다. 따라서 최종적으로 다음과 같은 소자 값이 최적의 pMOSFET 소자임을 확인 할 수 있었다.

최적의 pMOS 소자									
Vg=-2.5	Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Spacer_Dep
입력값	0.25	10	1e+17	3e+13	5e+16	3	10	3	0.3
Vd	V _{tgm}	SS	gm	Vg0_actual	I _{off} (=I _{min})	VgI _{on} _actual	I _{on} (=I _{max})		
-1.0	-1.1421	85.181	9.91e-05	0	4.93e-16	-2.5	1.35e-04		

결과값이 Target 범위를 만족하는지 최종검토

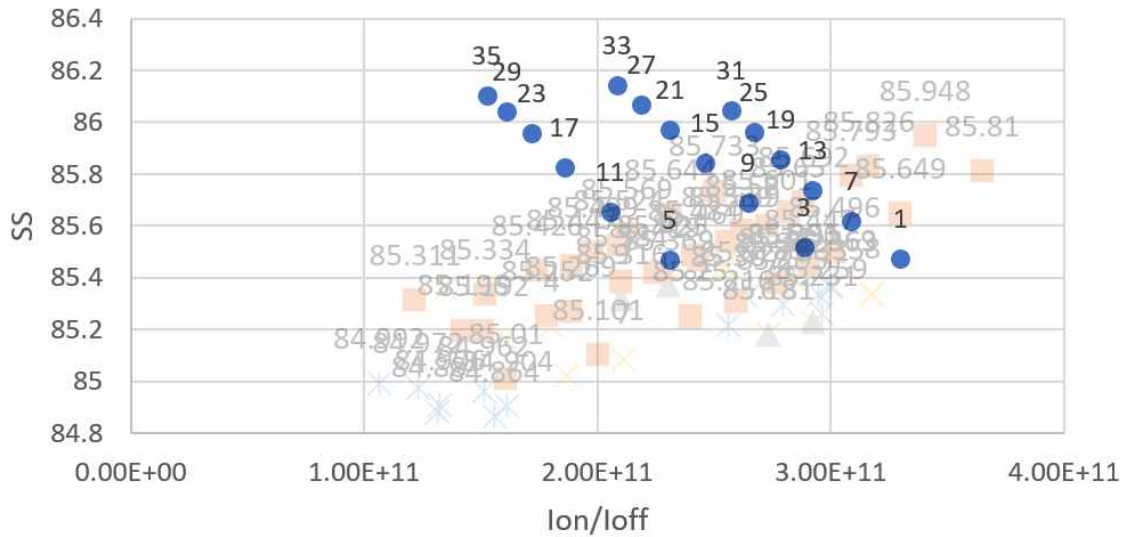
항목	Target	최종결과	만족여부
I _{on}	> 1e-5 A/um	1.35e-04	O
SS	< 100	85.181	O
I _{off}	< 1e-14 A/um	4.93e-16	O
Vtgm	PMOS	-1.1421	O

- 최적화된 소자를 공정마다의 공정 변수 변화 조건과 다시 비교해보기 위해 그래프를 작성하였다.



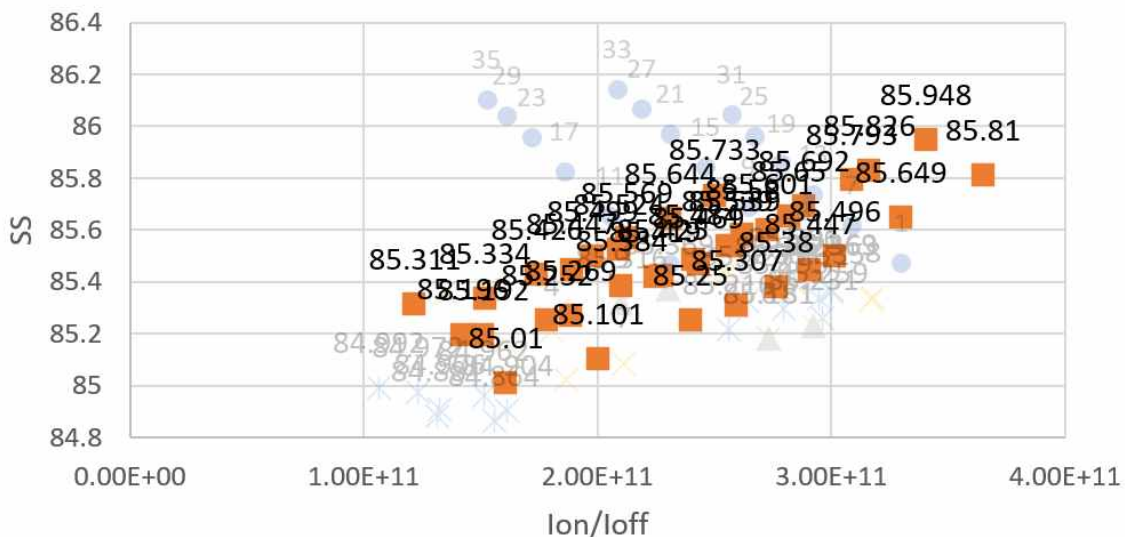
- 해당 공정 변수 변화에 따른 조건들을 하나씩 살펴보면, 최종 소자가 정말 최적화 소자가 맞는지 검토해 볼 수 있다.

전체 과정 비교



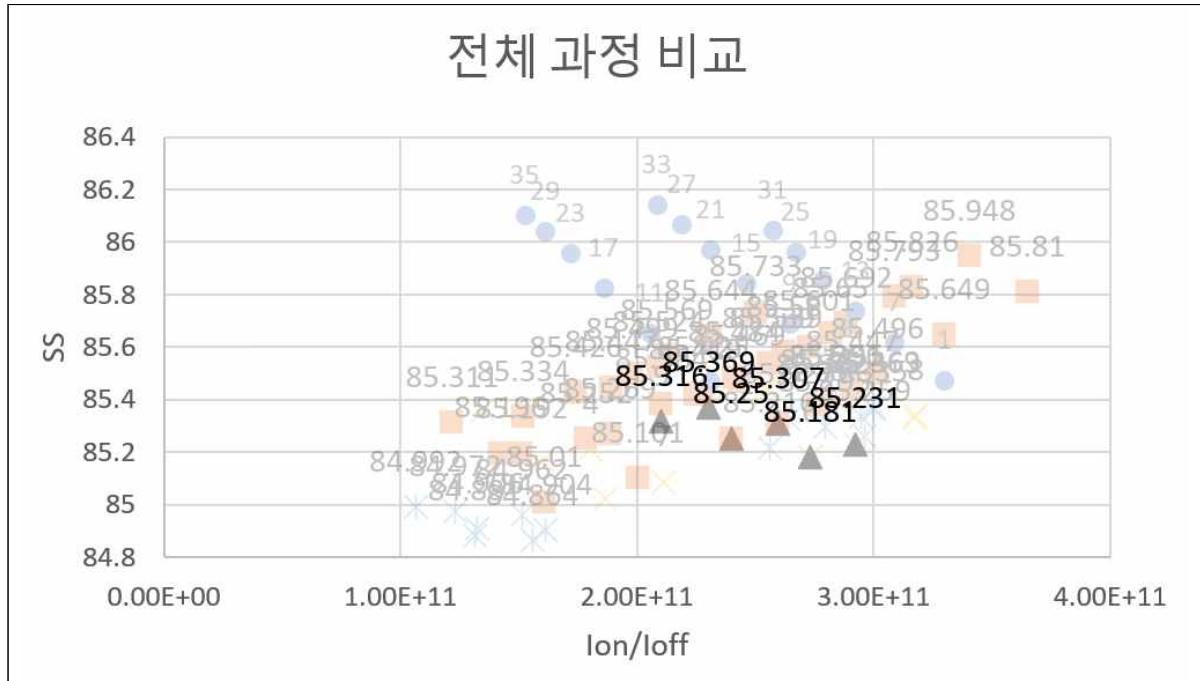
- 먼저 확인한 값은 LDD_Dose와 LDD_E를 Split 한 초기 값이다. 다른 후속 split 결과들에 비해 평균 SS 값이 높게 분포되어있다. 이는 해당 단계가 초기 탐색 과정으로, LDD_Dose와 LDD_E만 변화시키고 SD implant, RTA, Spacer_Dep 등의 공정 조건은 아직 최적화되지 않은 상태였기 때문이다. 또한 LDD 조건이 적절하지 않을 경우 extension 영역의 직렬저항 증가 또는 dopant 확산에 따른 drain field 증가가 발생하여 gate 제어성이 저하되고 SS가 증가할 수 있다. 반면 후속 split 결과들은 LDD 단계에서 우수한 후보를 선별한 뒤 추가 최적화를 진행한 값들이므로, 평균적으로 더 낮은 SS를 보인 것으로 판단된다.

전체 과정 비교

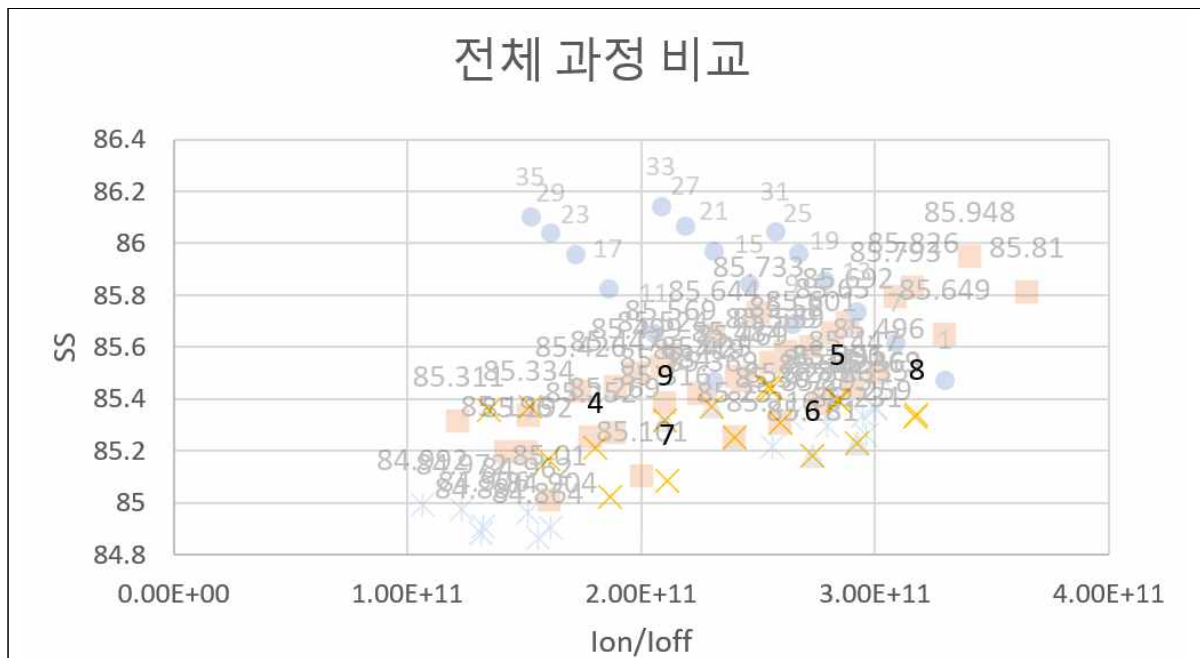


- 다음으로 확인한 값은 SD_Dose와 SD_E를 split 한 2번째 단계이다. 해당 과정에서는 LDD Split 결과보다 전반적으로 낮은 SS와 높은 I_{on}/I_{off} 영역으로 이동하였다. 이는 초기 LDD Split에서 우수한 후보를 먼저 선별한 뒤, source/drain implant 조건을 조절하여 직렬저항과 접합부 특성을 개선했기 때문으로 판단된다. 그러나 예외로 SS만 감소하고 I_{on}/I_{off} 은 감소한 영역도 많아졌음을 알 수 있는데, SD 변수의 변화로 drain 전기장과 누설전류가 완화되어 SS가 개선될 수 있지만, 동시

에 source/drain 직렬저항이 증가하거나 channel과의 연결성이 약해져 I_{on} 이 감소할 수 있기 때문이다. 이 경우 SS는 낮아지더라도 I_{on} 감소가 더 크게 작용하여 I_{on}/I_{off} 는 오히려 낮아지는 경향성을 보이기도한다.

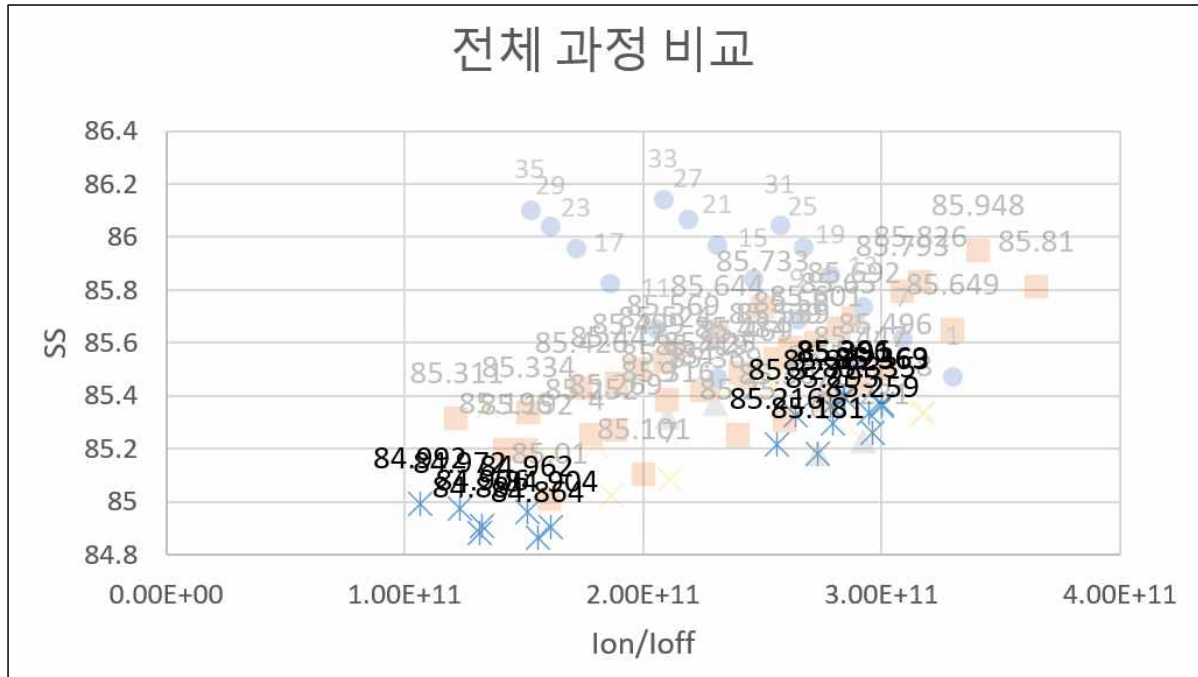


- 그 후 RTA Split 결과, 데이터는 이전 단계에 비해 비교적 낮은 SS 영역에 분포하였으며, 이는 RTA를 통해 implant된 dopant의 activation이 증가하고 source/drain 저항이 감소했기 때문으로 판단된다.



- 다음으로 Spacer_dep의 split 에 의한 결과이다.(노란색 엑스) Spacer_Dep split 결과, 노란색 X로 표시된 데이터는 전체 그래프에서 비교적 낮은 SS 영역에 분포하였으나, I_{on}/I_{off} 가 함께 크게 향상되는 일관된 경향은 나타나지 않았다.
- Spacer_Dep는 gate와 source/drain 영역 사이의 거리를 조절하여 drain 전기장과 직렬저항에 동시에 영향을 주는 변수이다. Spacer가 얇을 경우 직렬저항 감소로 I_{on} 확보에는 유리하지만

leakage와 SS 악화 가능성이 있고, spacer가 두꺼울 경우 전기장 완화에는 유리하지만 직렬저항 증가로 I_{on} 이 감소할 수 있다. 따라서 해당 결과는 Spacer_Dep 변화에 따른 전기장 완화 효과와 직렬저항 증가 효과가 서로 경쟁한 결과로 해석된다.



- 최종적으로 미세조정된 split 결과이다. 최종 미세조정 split 결과, 파란색 X로 표시된 데이터는 전체 split 값들에 비해 낮은 SS 영역에 집중되었으며, 일부 조건에서는 높은 I_{on}/I_{off} 도 함께 확보되었다. 이는 이전 단계에서 LDD, SD, RTA, Spacer_Dep 조건을 순차적으로 선별한 뒤, 우수 후보 주변에서 미세 조건을 조정했기 때문으로 판단된다. 다만 미세조정 결과는 하나의 최적점으로 완전히 수렴하지 않고, 낮은 SS를 갖는 영역과 높은 I_{on}/I_{off} 를 갖는 영역으로 나뉘어 나타났다. 이는 RTA에 의한 dopant activation과 diffusion, Spacer_Dep에 따른 전기장 완화와 직렬저항 변화가 동시에 작용하면서 I_{on}/I_{off} 와 SS 사이의 trade-off가 발생했기 때문이다. 따라서 최종 소자는 단순히 SS가 가장 낮은 조건이 아니라, I_{on}/I_{off} 가 충분히 크면서 SS도 낮게 유지되는 조건을 기준으로 선정하였다. (최종 결정한 소자보다 우수한 위치로 보이는 점들에 대한 설명은 6.추가고찰에서 진행하였다.)

5-3. 방법1(수치상비교)과 방법2(그래프)의 차이 및 최적의 소자 비교

- 해당 과제에서 2개의 방법을 통해 두 최적의 소자를 찾았다. 이번에는 두 방법에 대한 비교와, 각 결과값을 비교하여 정말 최적의 소자가 어느 방향에 가까운지를 비교해보려고 한다.
- 먼저, 단순 수치 비교는 각 조건에서 추출된 I_{on} , I_{off} , SS, Vtgm 값을 표로 정리한 뒤, 항목별로 어느 값이 더 좋은지 직접 비교하는 방식이다. 이 방법은 수치가 명확하기 때문에 특정 조건이 목표 기준을 만족하는지 판단하기 쉽고, I_{on} 최대화나 SS 최소화처럼 한 가지 지표를 비교할 때 유리하다. 하지만 여러 성능 지표가 동시에 trade-off 관계를 가질 경우, 전체적으로 가장 균형 잡힌 조건을 직관적으로 판단하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 해당 과정에서는 각 특성의 가감률을 고려하여 결정하였다.
- 반면 I_{on}/I_{off} -SS 그래프는 x축에 I_{on}/I_{off} , y축에 SS를 두고 각 조건을 하나의 점으로 표시하는 방식이다. 이 경우 I_{on}/I_{off} 가 클수록 좋고 SS가 작을수록 좋기 때문에, 일반적인 y축 기준에서는 오른쪽 아래에 위치한 점이 더 우수한 후보가 된다. 그래프를 사용하면 여러 조건의 분포와 trade-off 경향을 한눈에 확인할 수 있고, 단순히 I_{on} 이 큰 조건보다 on/off 전류비가 크면서 SS가 낮은 효율적인 조건을 선정하기 쉽다. 다만 그래프는 축 스케일이나 시각적 판단에 따라 해석이 달라질 수 있으므로, 최종 선정 시에는 그래프상의 위치와 실제 수치를 함께 확인해야 한다. 또한 값이 많아

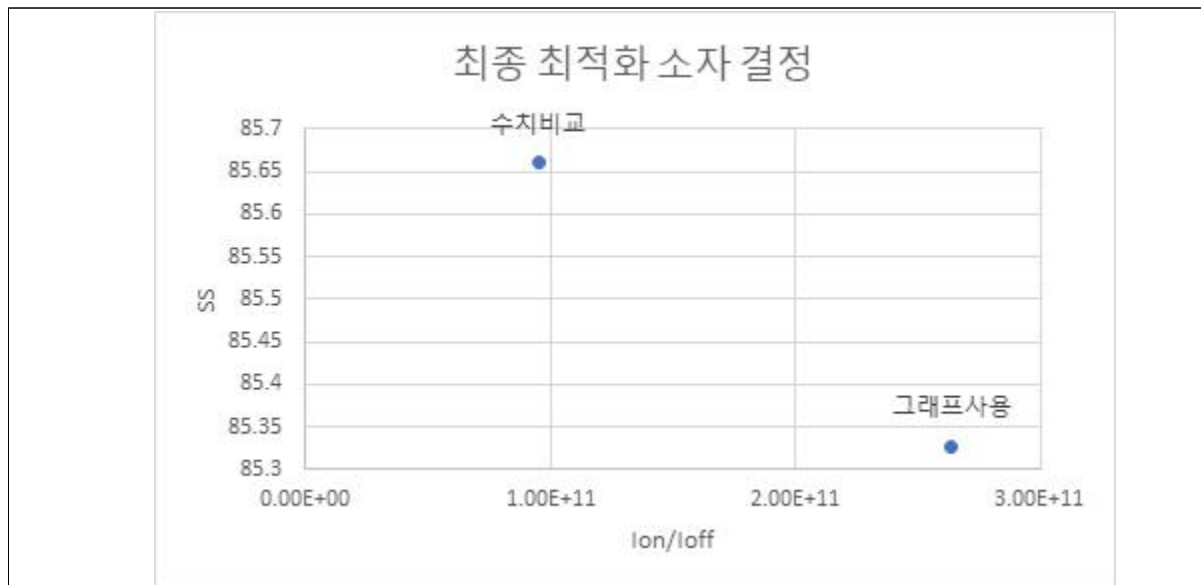
지면 많아질수록, 서로 겹치는 점들이 많아져 명확한 비교가 어렵다는 단점이 있다. 하지만 충분한 시간만 확보된다면, 수많은 상호작용을 일으키는 다양한 변수 변화를 동시에 확인할 수 있다는 점에서 충분히 강점이 있다.

- 이제 두 최적화 소자를 비교해보자.

최적의 pMOS 소자 (수치비교)									
Vg=-2.5	Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Spacer_Dep
입력값	0.25	10	1e+17	7e+13	4e+16	7	23	5	0.25
Vd	V _{tgm}	SS	gm	Vg0_actual	I _{off} (=I _{min})	VgI _{on} _actual	I _{on} (=I _{max})		
-1.0	-1.0878	85.660	1.044e-04	0	1.547e-15	-2.5	1.474e-04		
최적의 pMOS 소자 (그래프)									
Vg=-2.5	Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Spacer_Dep
입력값	0.25	10	1e+17	3e+13	5e+16	3	10	3	0.3
Vd	V _{tgm}	SS	gm	Vg0_actual	I _{off} (=I _{min})	VgI _{on} _actual	I _{on} (=I _{max})		
-1.0	-1.1421	85.181	9.91e-05	0	4.93e-16	-2.5	1.35e-04		

- 먼저 두 소자의 값들을 방법1(수치비교)로 확인해보자. 단순 수치를 통해 확인하면, 수치비교를 통한 최적소자가 더 높은 I_{on}값과 gm값을 가지고 있으며, 각각 9.2%, 5.3% 만큼 차이가 남을 확인할 수 있다. 분산 그래프를 활용해 찾은 최적의 소자의 경우, 수치비교 소자보다 I_{on}과 gm은 낮으나, I_{off}가 약 68.1%, SS가 약 0.56% 낮은 것을 알 수 있다. 이 때문에 소자 전체의 상호작용 trade-off를 고려하면 그래프를 이용한 소자가 훨씬 높은 균형성과 최적화를 가지고 있음을 알 nt 있다.

- 이번에는 I_{on}/I_{off}-SS 그래프를 이용하여 비교해보자.



- 그래프를 활용하면 보다 명확하게 그래프를 사용하여 얻은 최적화 소자가 더 좋은 소자임을 확인할 수 있다. 더 낮은 SS와 더 높은 전류비(I_{on}/I_{off})를 가짐을 확인할 수 있으며, 최종적으로 그래프를 사용하여 얻은 소자를 최종 최적화 소자로 선택하였다.

최적의 pMOS 소자 (최종)									
Vg=-2.5	Lg	GOxTime	NWell	LDD_Dose	SD_Dose	LDD_E	SD_E	RTA	Spacer_Dep
입력값	0.25	10	1e+17	3e+13	5e+16	3	10	3	0.3
Vd	V _{tgm}	SS	gm	Vg0_actual	I _{off} (=I _{min})	VgI _{on} _actual	I _{on} (=I _{max})		
-1.0	-1.1421	85.181	9.91e-05	0	4.93e-16	-2.5	1.35e-04		

6. 추가고찰

① 사실 최종적으로 찾은 pMOS 소자 조합은 정말 최선의 최적화 조합이 아닐 가능성이 있다. 실제로 5-2의 마지막 과정에서, 최종 소자와 이전 변수split 과정을 비교 할 때, RTA Split 과정에서 일부 값들이 최종 소자보다 우수한 위치에 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 이번 최적화가 모든 변수의 전체 조합을 동시에 탐색한 것이 아니라 각 공정 변수를 순차적으로 변화시키며 후보를 좁혀가는 방식으로 수행되었기 때문이다. 앞서 말한 것처럼, 각 소자 간 공정은 서로 상호작용 하기에 parameter 하나하나의 값을 조정해가며 찾는 것은 각 parameter 가 value에 미치는 영향을 파악하고 원하는 값을 찾아가기에는 용이하지만, 정말 최적의 소자를 찾는 것에는 부적합 하다고 볼 수도 있다. 따라서 장비의 성능과 시간이 충분하다면, 최대한 많은 parameter 경우의 수를 동시에 돌리며 최적값을 추적하는 것이 가장 좋은 방법이다.

② I_{off}와 I_{on} 값이 정확한 지점에서 나온 값인지에 대한 오류를 해결하기 위해, SVisual 코드 수정 때 'Vg0_actual'과 'VgIon_actual' 값을 추가하였다. Vg0_actual는 실제로 I_{off}를 읽은 gate voltage 값을 의미한다. 이론적으로는 Vg=0V에서 I_{off}를 읽는 것이 맞으나, 실제 시뮬레이션 데이터는 SDevice의 step 조건에 따라 정확히 0.0000V가 아닐 수도 있다. 이러한 오류 상황을 확인하고 넘어가기 위해 해당 gate voltage 값을 정확히 확인 할 수 있는 parameter를 추가했으며, 위 모든 과정들에서 해당 값이 0.0000 값이 나왔음을 알 수 있다. 이는 SDevice 코드 수정 과정에서, 보다 정확한 값을 얻기 위해 step 값들을 촘촘하게 수정한 덕분이라고 생각하며, 해당 I_{off}값이 정확히 0V 값에서 읽힌 확실한 데이터임을 의미한다. 또한 VgIon_actual 값은 실제로 I_{on}을 읽은 gate voltage 값이다. 이론적으로는 Vg=-2.5V 에서의 값을 읽어야 하지만 마찬가지로 실제 sweep data에는 정확히 -2.5000V 가 없을 수도 있다. 해당 코드에서는 @Vg@와 가장 가까운 점을 찾아 사용하도록 하였고 결과로 나온 I_{on} 값이 Vg=-2.5V(이론값)에서 얼마나 오차가 있는 값인지를 확인 할 수 있도록 해당 paramter를 추가하였다. 실제 결과값들을 보면, VgIon_actual 값들이 정확히 -2.5000 임을 확인할 수 있다. 이는 이론값과 동일한 I_{on}값이 도출되었음을 의미한다. (마찬가지로 step을 촘촘히 설정하였기에 정확한 값이 나왔을거라고 추정)

→ 만약 I_{off} 와 I_{on} 값이 이론값(Vg=0V,-2.5V) 가 아닌 약간 떨어진 값 (ex: -0.02V, -2.3V)에서 나왔다면 해석이 달라질 여지가 존재한다. 그러나 해당 과제 진행 결과에서는 각 I_{off} 와 I_{on} 값이 이론값과 동일한 위치에서 추출되었음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 증명한 I_{off}와 I_{on} 값의 신뢰도가 확인되었고, 해당 보고서 결과의 타당성이 입증되었음을 시사한다.

해당 두 parameter 의 코드는 다음과 같이 구성되어있다. (추가설명)

```
set npts [llength $Vgs]
```

- 먼저 Vgs 리스트에 들어있는 gate voltage 데이터 개수를 저장한다. (transfer curve를 이루는 전체 데이터의 x축 포인트 수를 의미)

```
#Vg=0V 에 가장 가까운 데이터를 찾기 위해 초기 기준값(변수) 설정(Ioff)
set best_i0 0
set best_d0 1e30
```

- best_i0는 가장 가까운 데이터의 인덱스를 저장하고, best_d0는 현재까지 찾은 최소 거리값을 저장하는데에 사용할 예정이다. 초기에는 아주 큰 값 1e30을 넣어두고, 이후 for 문을 통해 더 작은 차이를 찾으면 계속 갱신한다.

```
#Vg=-2.5V 에 가장 가까운 데이터를 찾기 위해 초기 기준값(변수) 설정(Ion)
set best_i0n 0
set best_d0n 1e30
```

- pMOS 이므로, Vg=@Vg@에 해당하는 점이 -2.5V 이다. 따라서 해당 값을 찾기 위해 다음과 같은 변수들을 설정했다. best_i0n : -2.5V 근처 데이터 인덱스, best_d0n : -2.5V와의 최소 차이거리 데이터로 활용될 예정이다.

```
for {set i 0} {$i < $npts} {incr i} {
    set vg [lindex $Vgs $i]
```

- 전체 gate voltage 데이터를 처음부터 끝까지 하나씩 확인한다. 현재 추출한 Vgs 리스트에서 I번째 인덱스에서의 gate voltage 값을 vg로 가져와 이후 거리 계산을 하는데에 사용한다.

```
#Vg=0V와 거리계산 (Ioff)
set d0 [expr {abs($vg - 0.0)}]
if {$d0 < $best_d0} {
    set best_d0 $d0
    set best_i0 $i
}
```

- 현재 gate voltage 값 vg가 0V와 얼마나 가까운지 계산한다. 그 차이가 지금까지 저장해둔 최소 차이보다 작으면, 그 점을 새로운 최적 후보(best_d0에 저장)로 저장한다. (해당 구문이 반복되면서 최종적으로 0V에 가까운 gate voltage 값이 도출되도록 한다. 또한 거리의 크기만 남기기 위해 절대값abs로 설정)

```
#Vg=-2.5V(pMOS에서 @Vg@)와 거리계산 (Ion)
set d0n [expr {abs($vg - @Vg@)}]
if {$d0n < $best_d0n} {
    set best_d0n $d0n
    set best_i0n $i
}
```

- 마찬가지로 현재 gate voltage 값이 @Vg@ (=pMOS에서 -2.5로 설정)와 얼마나 가까운지 계산후 best_d0n 값을 가장 가까운 값으로 대체 한다.
- 해당 과정들을 충분히 반복해 원하는 기준점에 가까운 값에 도달하면 다음 코드를 통해 추출값을 저장한다.

```
set Vg0_actual [lindex $Vgs $best_i0]
set Ioff [lindex $Ids $best_i0]
set Imin [lindex $Ids $best_i0]

set Vg0n_actual [lindex $Vgs $best_i0n]
set Ion [lindex $Ids $best_i0n]
set Imax [lindex $Ids $best_i0n]
```

Vg0_actual : 실제로 I_{off} 를 읽은 gate voltage 값
 I_{off} , I_{min} : 그 지점의 전류
VgIon_actual : 실제로 I_{on} 을 읽은 gate voltage 값
 I_{on} , I_{max} : 그 지점의 전류

- 이러한 구문을 통해 I_{off} 와 I_{on} 만 뽑는 것이 아닌, 과정의 정확도를 위해 그 전류를 정확히 어느 gate voltage에서 읽었는지도 함께 저장했다.

③ 이번 PMOS 최적화 과정을 통해 소자 특성은 하나의 공정 변수만으로 결정되는 것이 아니라, LDD_Dose, LDD_E, SD_Dose, SD_E, RTA, Spacer_Dep와 같은 여러 공정 변수가 서로 상호작용한 결과로 나타난다는 것을 확인하였다. 예를 들어 SD_Dose 증가가 source/drain 저항을 낮추어 I_{on} 향상에 유리하게 작용할 수 있지만, 동시에 접합부 전기장 증가로 I_{off} 나 SS가 악화될 수 있었다. 또한 RTA는 dopant activation을 증가시키는 장점이 있지만, diffusion 증가로 인해 오히려 leakage 특성이 나빠질 가능성도 있었다. 따라서 각 공정 변수는 독립적으로 최적화되는 것이 아니라, 다른 변수들과의 조합 속에서 최종 소자 특성을 결정한다는 점이 중요하다는 것을 알 수 있었다.

초기에는 I_{on} , I_{off} , SS, gm 등의 값을 단순 수치로 비교하여 우수한 조건을 선정하였다. 이 방법은 각 항목의 변화량을 명확하게 확인할 수 있고, 특정 성능 지표가 얼마나 개선되었는지 정량적으로 판단하기 쉽다는 장점이 있었다. 그러나 단순히 I_{on} 이 큰 조건을 선택할 경우 I_{off} 도 함께 증가하여 I_{on}/I_{off} 가 낮아질 수 있으며, SS와의 균형을 직관적으로 판단하기 어렵다는 한계가 있었다.

반면 I_{on}/I_{off} -SS 그래프를 이용한 비교에서는 각 조건을 하나의 점으로 나타내어, on/off 전류비와 gate 제어성 사이의 관계를 한눈에 확인할 수 있었다. x축 I_{on}/I_{off} 는 클수록 좋고 y축 SS는 작을수록 좋기 때문에, 그래프상 오른쪽 아래에 위치한 조건을 우수 후보로 판단할 수 있었다. 이를 통해 단순히 I_{on} 이 가장 큰 조건이 아니라, I_{off} 가 억제되어 I_{on}/I_{off} 가 크고 SS도 낮게 유지되는 조건을 최종 소자로 선정할 수 있었다.

최종적으로 해당 과정은 공정 변수를 단계적으로 조절하며 후보를 좁혀가는 방식이 계산 시간을 줄이는 데 효율적이지만, 모든 변수 조합을 동시에 고려하지 못하기 때문에 전역 최적값이 아닌 제한된 범위 내의 최적 소자를 찾는 방식이라는 한계도 있음을 보여주었다. 따라서 가장 효율적인 최적화 방법은 단순 수치 비교로 각 변수의 경향을 파악하고, 이후 I_{on}/I_{off} -SS 그래프를 통해 성능 간 상관관계를 시각적으로 분석하며, 최종 후보에 대해 미세 split을 수행하는 방식이라고 판단된다. 이를 통해 공정 변수 간 상호작용을 고려하면서도 계산량을 줄이고, 최종적으로 균형 잡힌 PMOS 소자를 선정할 수 있었다.