

Lidar 및 ToF 시스템을 위한 나노초 급 정밀 레이저 펄스 제어 구현

Leaphar Castro

Member Group Technical Staff

Anant Sinha

Application Engineer, High-Speed Amplifiers

소개

자율 주행 차량, 산업 자동화 및 첨단 로봇의 채택이 증가함에 따라 안정적인 3D 거리 측정 및 감지에 대한 수요가 늘고 있습니다. Lidar 및 ToF(비행시간)시스템은 거리 및 공간 정보를 측정하기 위해 정밀하게 제어되는 레이저 펄스에 의존합니다. 이러한 요구 사항을 충족하려면 높은 피크 전류를 제공함과 동시에 온도 변화 및 노화에도 펄스 간 안정성을 유지하는 레이저 드라이버가 필요합니다. 항해 또는 고속 산업 검사에 사용되는 이 시스템은 실제 운용 조건에서 빠르고 안정적이며 재현 가능한 레이저 펄스에 의존합니다. 게이트 드라이버, 외부 전계 효과 트랜지스터 및 전류 센싱 요소를 사용하는 기존의 이산형 토폴로지는 특정 설계 요구 사항을 충족할 수 있지만, 레이아웃 복잡성, 교정 노력 및 열 성능 측면에서 트레이드오프가 발생하는 경우가 많습니다.

레이저 펄스 제어가 어려운 이유는 무엇입니까?

레이저 드라이버는 단순히 전류를 전달하는 것 이상의 역할을 수행합니다. 이는 lidar 및 ToF 시스템이 거리를 산출하는 데 사용하는 타이밍 정보에 직접적인 영향을 미칩니다. 여러 소스로 구성된 간단한 타이밍 변동 여유를 고려해 보십시오. 이 문서에서는 세 가지 기여 요인을 다룹니다:

- 상승 및 하강 시간($t_{r/f}$): 펄스가 감지 임계값을 통과하는 속도.
- 전파 지연(t_{pd}): 트리거 발생 시점부터 실제 광 방출까지 소요되는 시간.
- 펄스 간 변화(t_{pp}): 펄스 간 타이밍이나 진폭이 얼마나 드리프트되는지.

상승 및 하강 시간이 미치는 영향

Lidar 및 ToF 시스템은 레이저 펄스가 대상으로 이동하고 리시버로 돌아가는 왕복 시간을 산출하여 거리를 측정합니다. 미세한 거리 변화를 구별하는 능력은 펄스 에지가 무광 상태에서 최대 광량으로 얼마나 빨리 전환되는지에 따라 달라집니다. 상승 및 하강 시간이 빠르면 거리의 불확실성을 줄이고 리시버에 더 선명한 기준점을 제공합니다. 고해상도 시스템에서 상승 및 하강 시간은 일반적으로 1ns에서 5ns 사이입니다.

펄스 에지가 느리면 시스템은 신호가 리시버 감지 임계값을 넘어서는 정확한 순간을 결정할 수 없습니다. 1ns 에지에 해당하는 $t_{r/f}$ 은 약 150mm의 거리 불확실성을 유발하며, 이는 **방정식 1**에 의해 근사됩니다:

$$\Delta D = \frac{ct_{r/f}}{2} \quad (1)$$

여기서 ΔD 는 델타 거리이고 $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 입니다.

이러한 불확실성은 펄스 에지가 느려질수록 증가하며, 패키지 및 인쇄 회로 보드(PCB) 인덕턴스와 같은 파생이 레이저 다이오드 및 드라이버 출력의 커패시턴스와 함께 이를 제한할 수 있습니다. 예를 들어, $t_{r/f}$ 를 500ps에서 1ns로 늘리면 거리가 두 배가 되고, 2ns의 에지는 이를 거의 300mm로 확장하여 ΔD 보다 더 작은 대상 거리 차이를 구별할 수 있는 시스템의 능력을 제한합니다.

전파 지연

고속 광학 시스템에서는 1나노초 단위의 오차도 중요합니다. 전파 지연이 온도, 공급 전압 또는 부품 공차에 따라 변하면 거리 계산에 사용되는 타이밍 레퍼런스가 이동하며 채널 간 동기화를 저해할 수도 있습니다. 직접 ToF 애플리케이션(dToF)에서 t_{pd} 의 100ps 변동은 **방정식 2**에 표시된

ToF 관계를 기반으로 약 30mm의 거리 오류에 해당합니다:

$$D = c \times t \quad (2)$$

여기서 $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$, D는 거리이고 t는 시간입니다.

과도한 지연은 범위 오류로 직접 이어집니다. **그림 1**에서 보듯이, 500ps 변동은 150mm 이상의 왕복 거리 오류를 일으킬 수 있으며, 이는 센티미터 또는 밀리미터 수준의 정확도를 목표로 하는 dToF 시스템에서는 허용되지 않습니다.

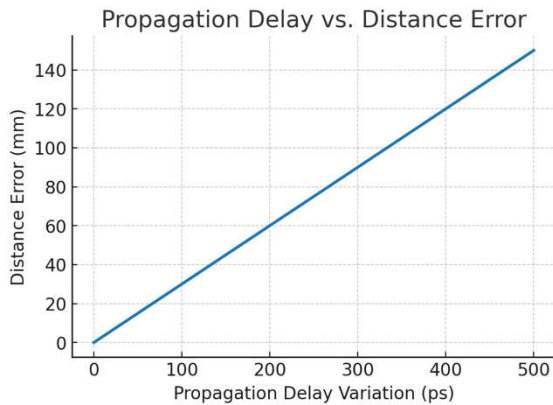


그림 1. 전파 지연 대 거리 오류(추정)

시스템 정렬 중에 고정 지연을 교정할 수 있지만 자체 발열과 같은 가변 지연은 쉽게 교정할 수 없는 측정 간 불확실성을 유발합니다.

펄스 간 안정성

빠르고 폭이 좁은 레이저 펄스라도 각 펄스 간에 일관성을 유지해야 합니다. 피크 전류의 변화는 광학 전력의 변화로 직접 이어져 측정 정확도와 시스템 신뢰성을 저하시킵니다. 온도 변화, 전원 변동 및 장치 노화 등이 이러한 드리프트의 일반적인 원인입니다.

시스템 관점에서 리시버는 반환된 광학 신호에 의존하여 거리를 결정합니다. 따라서 펄스 강도의 차이는 범위 변화로 잘못 해석될 수 있으며, 특히 복귀 신호가 감지 임계값에 근접하는 원거리에서 이러한 현상이 두드러집니다. 임계값 기반 거리 측정 시스템에서 피크 전류의 1% 변화는 광학 전력에 약 1%의 변화를 발생시키며, 이로 인해 수십 센티미터 단위의 거리 오차가 발생할 수 있습니다. **그림 2**에 나와 있는 것처럼, ±2%에서 ±5% 수준의 미세한 진폭

변화라도 펄스당 전달되는 펄스 엔벨로프와 광 에너지를 변화시켜, 시간이 지남에 따라 거리 측정 정확도와 재현성을 저하시킬 수 있습니다. 따라서 고성능 설계에서는 드라이브 전류를 엄격하게 제어하여 모든 작동 조건에서 t_{pp} 의 변동을 몇 퍼센트 이내로 유지합니다.

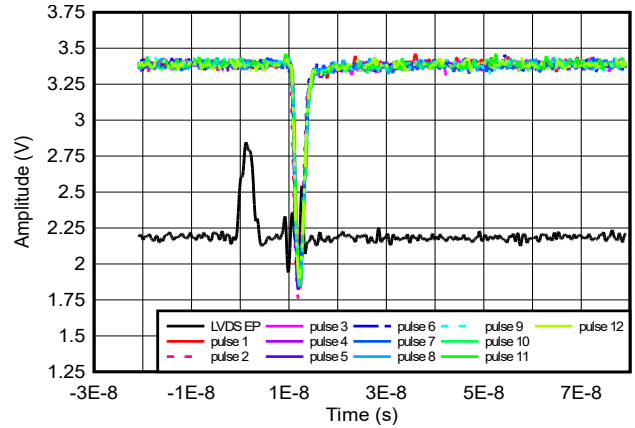


그림 2. 12 펄스, 1.5A 전류, $R_{damp} = 1\Omega$ 및 5Ω 저항과 330pF cap으로 구성된 2개의 스너버 쌍, $AVDD = PVDD = VLD = 5\text{V}$ 조건에서의 펄스 간 진폭

시스템 수준의 타이밍 제약 조건이 정의되면, 다음 단계는 이를 실질적인 레이저 드라이버 구현으로 변환하는 것입니다.

정밀한 레이저 펄스 제어 구현

정확한 레이저 펄스를 생성하려면 단순히 다이오드에 전류를 공급하는 것 이상의 기술이 필요합니다. 드라이버는 빠른 에지, 예측 가능한 지연 및 재현성 있는 펄스 진폭을 갖춘 높은 피크 전류를 공급해야 합니다. TI의 LMH13000 고속 레이저 드라이버는 V_{SET} 핀의 입력 전압을 I_{OUT} 에서 정밀하게 제어된 싱크 전류로 변환하여 펄스를 생성하며, 이는 **방정식 3**에 설명된 바와 같습니다. DAC(디지털-아날로그 컨버터) 또는 레퍼런스 소스는 V_{SET} 를 설정하고, 장치의 내부 전류 미러 및 제어 회로는 **그림 3**에 나와 있는 것처럼 레이저 다이오드를 통해 전류를 조정합니다. 설계자는 V_{SET} , R_{SET} 및 레이저 양극 바이어스 전압(VLD)을 신중하게 선택함으로써 펄스 진폭, 타이밍 및 전체 펄스 안정성을 조정할 수 있습니다.

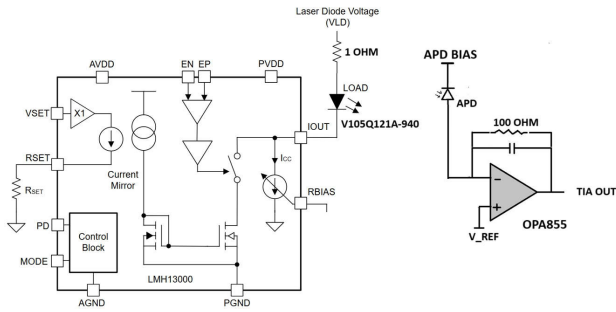


그림 3. 다이오드와 LMH13000을 포함한 회로도 전송 경로 블록 다이어그램

다음은 펄스 전류 및 속도 설정을 위한 설계 단계입니다.

1. 대상 출력 전류(I_{OUT})를 정의합니다. 레이저 다이오드에 필요한 광학 전력을 먼저 파악합니다. 방정식 3은 (는) 레이저의 기율기 효율에 의해 설정된 피크 출력 전류를 나타냅니다:

$$I_{OUT} = \frac{P_{OPT}}{\eta} \quad (3)$$

여기서 P_{OPT} 는 원하는 광학 출력 전력이고 η 는 레이저의 기율기 효율(암페어당 와트)입니다. 예를 들어, $P_{OPT} = 1W$ 및 $\eta = 0.5W/A$ 인 경우 $I_{OUT} = 2A$ 입니다.

LMH13000은 최대 5A의 펄스 전류를 지원하므로 선택한 레이저 다이오드는 이 한도 이하에서 목표 광학 전력을 달성해야 합니다. I_{OUT} 을 정확하게 설정하는 것은 t_{pp} 를 최소화하고 진폭에 따른 타이밍 오류를 줄이기 위해 매우 중요합니다.

2. R_{SET} 및 V_{SET} 를 선택합니다. LMH13000은 V_{SET} 과 R_{SET} 의 비율을 사용하여 출력 전류를 설정하며, 이는 내부 게인 계수인 k (방정식 4)에 의해 스케일링됩니다.

$$I_{OUT} = \frac{V_{SET}}{R_{SET}} \times k \quad (4)$$

고전류 모드(MODE = 1)에서 $k \approx 50k$ 입니다. 예를 들어, $R_{SET} = 20k\Omega$ 및 $V_{SET} = 0.8V$ 인 경우:

$$I_{OUT} = \frac{0.8}{20k} \times 50k \approx 2.0A$$

DAC를 사용하여 V_{SET} 을 트리밍함으로써 미세 조정이 가능합니다. LMH13000은 전류를 온칩으로 조정하기

때문에, 이러한 방식은 온도 및 공급 변동에 대한 민감도를 최소화하여 타이밍 여유 내에서 t_{pp} 를 작게 유지하는 데 도움이 됩니다.

3. VLD를 설정합니다. VLD는 빠른 전류 전환 중에 필요한 레이저 순방향 전압 및 동적 전압을 지원할 수 있을 만큼 충분히 높아야 합니다. LMH13000 데이터 시트는 방정식 5을(를) 크기 조정 지침으로 제공합니다:

$$VLD = V_{OUT(MIN)} + V_F \times \frac{dI}{dt} + I_{OUT} \times (R_{LASER} + R_{DAMP}) \quad (5)$$

여기서:

- V_{IOUT} 은 I_{OUT} 에서 최소 규격 준수 전압입니다
- V_F 는 I_{OUT} 에서 레이저의 순방향 전압입니다
- L 은 전체 루프 인덕턴스(패키지 및 PCB)입니다
- dI/dt 는 상승 및 하강 요구 사항으로 인한 전류 회전율(초당 암페어)입니다
- R_{LASER} 는 레이저 다이오드의 동적 저항입니다
- R_{DAMP} 는 레이저 다이오드의 외부 저항입니다

예를 들면 다음과 같습니다:

$$V_{IOUT(MIN)} = 6V$$

$$V_F = 2V$$

$$L = 3nH$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{2A}{1ns} = 2 \times 10^9 A/s$$

$$R_{LASER} = 0.3\Omega$$

$$R_{DAMP} = 1\Omega$$

$$VLD \approx 6 + 2 + (3 \times 10^{-9})(2 \times 10^9) + 2(0.3 + 1.0) \approx 16.6V$$

따라서 시작 값으로는 17V가 적합합니다. VLD를 높이면 에지 속도가 향상되지만 오버슈트가 증가할 수 있으므로 신중한 튜닝이 필요합니다. 적절한 VLD를 선택하면 오버슈트를 제한하면서 빠른 전환을 보장하여 전체 총 타이밍 변화 (t_{total}) 여유에 대한 상승 및 하강 시간($t_{r/f}$) 기여도를 직접 줄일 수 있습니다.

4. 상승 및 하강 시간과 댐핑을 최적화합니다. 드라이버 성능과 회로 파생 성분 모두 상승 및 하강 시간에 영향을 미칩니다. 적절한 댐핑 없이 빠른 전류 펄스 전환은 레이저와 PCB 루프에서 링잉을 발생시켜 오버슈트와

불안정한 광학 펄스가 발생할 수 있습니다. 설계자는 일반적으로 I_{OUT} 노드에 댐핑 저항기와 스너버 네트워크를 추가하여 이 문제를 해결합니다. 저항기와 스너버가 함께 파생 링잉을 억제하고, 빠른 에지를 유지하며, $t_{r/f}$ 가 불필요하게 t_{total} 을 증가시키지 않도록 방지합니다.

방정식 6를 사용하여 계산된 드라이버의 출력 커패시턴스를 기반으로 스너버 커패시터를 선택합니다:

$$C_{SNUB} \approx 5 \times C_{IOUT} \quad (6)$$

여기서 C_{IOUT} 은 I_{OUT} 핀의 유효 커패시턴스입니다. $C_{IOUT} = 40\text{pF}$ 인 경우 $C_{SNUB} \approx 200\text{pF}$ 입니다.

레이저 및 스너버 네트워크와 직렬로 작은 댐핑 저항을 추가하면 원치 않는 진동이 억제됩니다. **그림 4**에서 보듯이, R_{DAMP} 및 R_{SNUB} 의 일반적인 값은 $5\Omega \sim 10\Omega$ 범위이며, 스너버 커패시터는 출력 노드 커패시턴스에 맞춰 크기가 결정됩니다. 최악의 경우(최고) C_{IOUT} 을 기준으로 C_{SNUB} 을 선택하고, 검증 과정에서 이를 트리밍하여 오버슈트와 에지 속도 사이의 균형을 맞춥니다. **그림 5**에서 볼 수 있듯이, 이 접근 방식은 빠른 전환과 PCB 파생으로 인한 링잉을 줄이는 동시에 정밀한 펄스 제어에 필요한 서브 나노초 수준의 $t_{r/f}$ 를 유지합니다.

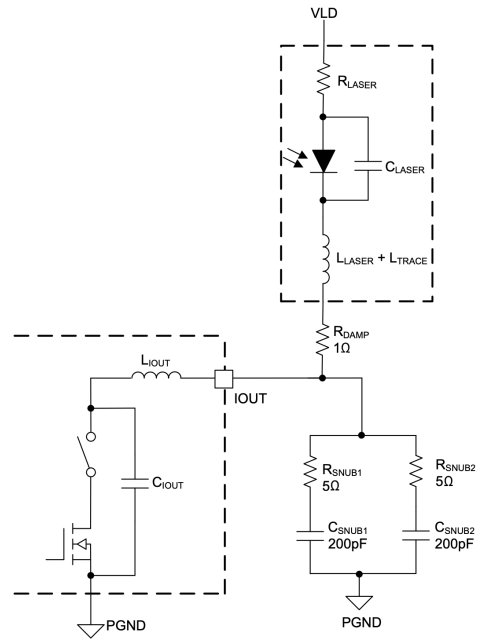


그림 4. 댐핑 저항 및 스너버 네트워크 회로

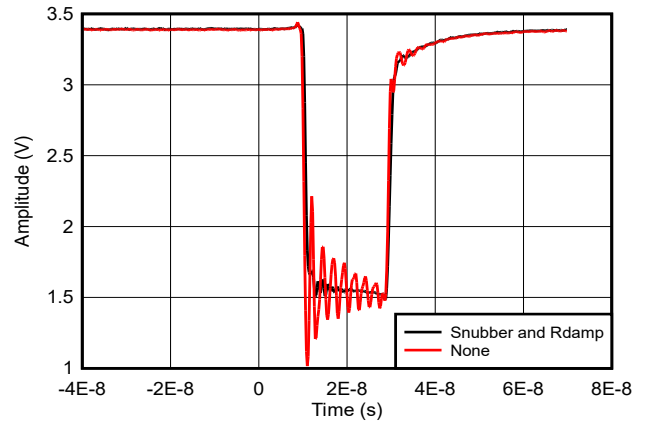


그림 5. 스너버 회로 또는 R_{DAMP} 유무에 따른 LMH13000 펄스

5. 전파 지연을 제어합니다. 상승 및 하강 시간과 달리 전파 지연은 특정 공식으로 정의되지 않으며 레이아웃 및 인터페이스 방식에 따라 달라집니다:

- 입력 라우팅. 100Ω 종단이 있는 EP 핀 및 EN 핀에 차동 라우팅을 사용하거나, LMH13000 입력부에서 제어된 임피던스와 적절한 종단을 적용한 단일 종단 입력을 라우팅합니다.
- 출력 루프. 고전류 I_{OUT} 루프를 짧게 유지하고 PGND와 긴밀하게 결합하여 유도성 지연과 링잉을 최소화합니다.

- 시스템 교정. ToF 측정 여유에 드라이버-레이저 경로를 포함하여 잔류 시스템 지연을 반영합니다.

그림 6에서 보듯이, 트레이스 인덕턴스를 최소화하고 일관된 입력 종단을 보장하면 t_{pd} 의 변화를 줄여 이러한 기여도를 적고 예측 가능한 수준으로 유지할 수 있습니다. 훨씬 더 높은 정확도가 필요하거나 온도 기반 교정이 실용적이지 않은 애플리케이션의 경우 LMH13000 데이터시트의 섹션 6.3.2에서는 레이저 단계를 직접 모니터링하여 고정밀 시동 펄스 생성 기술을 제공합니다.

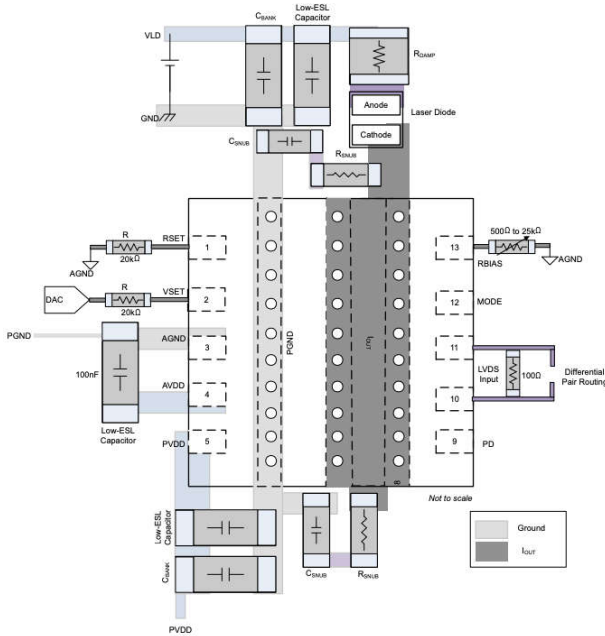


그림 6. 표면 실장 장치 패키지 내 LMH13000의 레이아웃 예시

펄스 시스템에서의 정밀한 펄스 제어

Lidar 및 ToF 시스템은 일반적으로 펄스 모드에서 작동하여 긴 오프 타임으로 분리되는 고전류 버스트를 생성합니다. 이 모드에서는 전류 파형이 신속히 안정화되어야 하며, 모든 펄스에서 동일한 피크 값에 도달해야 합니다. 일반적인 접근 방식은 VLD를 통해 레이저 양극을 사전 바이어싱하고 LMH13000의 LVDS(저전압 차동 신호)입력(EP, EN)을 사용하여 펄스를 게이트하는 것입니다. 이를 통해 V_{SET} 핀이 진폭을 설정하고 LVDS 입력이 타이밍을 독립적으로 제어합니다.

$R_{DAMP} = 2.6\Omega$, $VLD = 12V$ 및 $I_{OUT} = 400mA$ (레이저 다이오드: Osram의 PLT5 518FB_P) 조건에서 그림 7은(는) 레이저 다이오드를 사용한 실험 결과를 보여줍니다. 그림에서

파란색은 활성화, 노란색은 시작 펄스, 주황색은 V_{ANODE} 입니다. 진폭과 타이밍의 디커플링은 펄스 간 드리프트를 최소화하고 빠른 에지를 보존하여 진폭 안정성(t_{pp})과 에지 일관성($t_{r/f}$)을 모두 개선하여 t_{total} 을 더욱 낮춥니다.

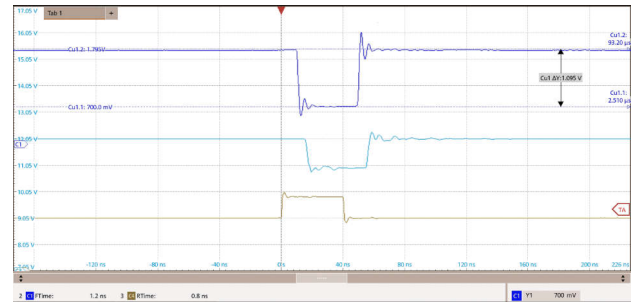


그림 7. 펄스 모드에서의 정밀한 펄스 제어

트랜스미터 테스트 결과를 사용한 실제 사례

표 1에 나와 있는 lidar 트랜스미터 조건에서 LMH13000을 테스트하면 설계 원칙이 확인됩니다.

설계 매개 변수	값
다이오드	V105Q121A-940
아날로그 VDD 및 전원 VDD	5V
모드	1
펄스 전류	피크 2A
펄스 폭	0.6ns, 0.7ns
R_{SET}	20k Ω
V_{SET}	0.5V(DAC에 의해 설정)
VLD	4.5V, 5V, 6.5V
댐핑 네트워크	$R_{DAMP} = 1\Omega$ $R_{SNUB} =$ 해당없음 $C_{SNUB} =$ 해당없음 (스너버 없음)

표 1. LMH13000 펄스 드라이버 예제의 설계 매개 변수

그림 3은(는) 레이저를 바이어싱하고 LMH13000을 구성하는 데 사용되는 회로 회로도를 보여주는 테스트 설정을 보여줍니다.

그림 8은(는) 펄스 작동 중 서로 다른 VLD 바이어스 전압에서 LMH13000의 광학 응답을 보여줍니다. 과도 파형은 VLD가 상승 시간, 오버슈트 및 정상 상태 전류 조절에 직접 영향을 미치는 방법을 보여줍니다. VLD가 낮으면 에지 전환이 느려지는 반면 VLD가 높으면 속도가 향상되지만 오버슈트가 증가할 수 있습니다. 따라서 적절한 VLD를 선

택하면 $t_{r/f}$ 을 펄스 안정성 사이의 균형을 유지하여 전체 변동 여유에 대한 기여도를 최소화합니다.

이 설계는 신중한 바이어싱 및 감쇠가 최소한의 오버슈트와 반복 가능한 성능으로 빠르고 안정적인 광학 펄스를 생성하는 방법을 보여줍니다. 이 설계는 변동 여유에 따라 $t_{r/f} < 1\text{ns}$, t_{pd} 변화 $< 50\text{ps}$ 및 $t_{pp} < 2\%$ 를 달성합니다. 이러한 결과 t_{total} 이 1ns 미만이 되어 밀리미터 수준의 범위 정밀도를 구현할 수 있습니다. 온도 센서를 통합하여 지연 드리프트 및 진폭 시프트를 실시간으로 보상하고 변동 여유에 대한 환경 기여를 더욱 줄임으로써 추가적인 개선이 가능합니다.

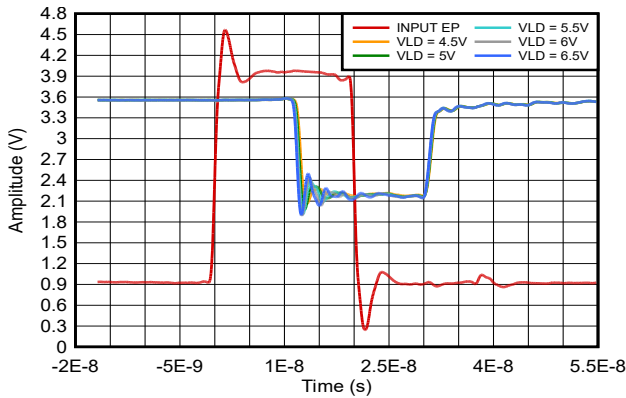


그림 8. 4.5, 5, 5.5, 6 및 6.5 VLD 바이어스 전압에서의 광학 응답

결론

정밀한 레이저 펄스 제어에는 에지 속도, 타이밍 정확도, 안정성 및 광학 전력 일관성의 균형이 필요합니다. LMH13000은 고속 전류 드라이브 및 조정을 소형 솔루션에 통합함으로써 설계 복잡성을 줄이고 반복성과 성능을 향상시킵니다.

이 레이저 드라이버는 간단한 피드백 및 온도 모니터링 기술과 결합될 경우 연속 및 펄스 레이저 작동을 위한 안정적인 플랫폼을 제공하며 까다로운 lidar, ToF 및 산업용 광학 센싱 애플리케이션에서 신뢰성 높고 정확한 성능을 구현합니다.

추가 리소스

- 애플리케이션 개요 **LMH13000을 사용한 레이저 다이오드용 자동 전력 제어**를 읽어보세요.
- **차량용 Lidar 소개** 백서를 확인하세요.
- **LMH13000 TINA-TI™ 소프트웨어 Spice 모델**을 다운로드하세요.

작성자 소개

Leaphar Castro는 텍사스 인스트루먼트의 제품 마케팅 엔지니어로, 고속 증폭기 제품을 전문으로 하며 산업 자동화를 비롯한 다양한 산업용 시장을 지원합니다. 2016년 센트럴 플로리다 대학교에서 전기공학 학사 학위를 받았습니다. Leaphar는 TI의 기술 직군 체계의 그룹 기술 직원입니다.

Anant Sinha는 텍사스 인스트루먼트의 고속 증폭기 제품에 중점을 둔 애플리케이션 엔지니어입니다. Jadavpur University에서 계측 및 전자 공학 학사 학위를 받았습니다.

중요 알림: 이 문서에 기술된 텍사스 인스트루먼트의 제품과 서비스는 TI의 판매 표준 약관에 의거하여 판매됩니다. TI 제품과 서비스에 대한 최신 정보를 완전히 숙지하신 후 제품을 주문해 주시기 바랍니다. TI는 애플리케이션 지원, 고객의 애플리케이션 또는 제품 설계, 소프트웨어 성능 또는 특허권 침해에 대해 책임을 지지 않습니다. 다른 모든 회사의 제품 또는 서비스에 관한 정보 공개는 TI가 승인, 보증 또는 동의한 것으로 간주되지 않습니다.

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](#) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025