

Đề 11: Thiết kế mạch đo ánh sáng sử dụng LDR. Mạch có tầm đo 10-100lux, độ phân giải 5 lux, ngõ ra là dòng điện tương ứng từ 4-20mA (nối đất):

I. Phân tích thiết kế mạch

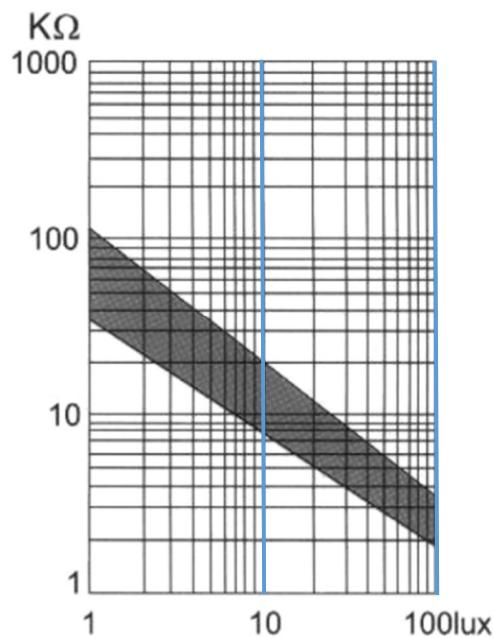
a. Lựa chọn và mô phỏng LDR 2 dây (có điện trở dây dẫn là 10Ω).

Lựa chọn LDR: GL5528

Light Resistance at 10Lux (at 25°C)	8~20KΩ
Dark Resistance at 0 Lux	1.0MΩ(min)
Gamma value at 100-10Lux	0.7
Power Dissipation(at 25°C)	100mW
Max Voltage (at 25°C)	150V
Spectral Response peak (at 25°C)	540nm
Ambient Temperature Range:	- 30~+70°C

Outline

Illuminance Vs. Photo Resistance



Spectral Response

Theo datasheet ta có: tại 10 lux Light resistance at 25° C: 8 ~ 20 Kohm

Chọn R_{p0} (10 lux) = **10 Kohm**

Có Gamma value at (10 – 100 lux) : **0.7**

Tính giá trị R ứng cho tại các điểm lux còn lại theo công thức:

Equation:

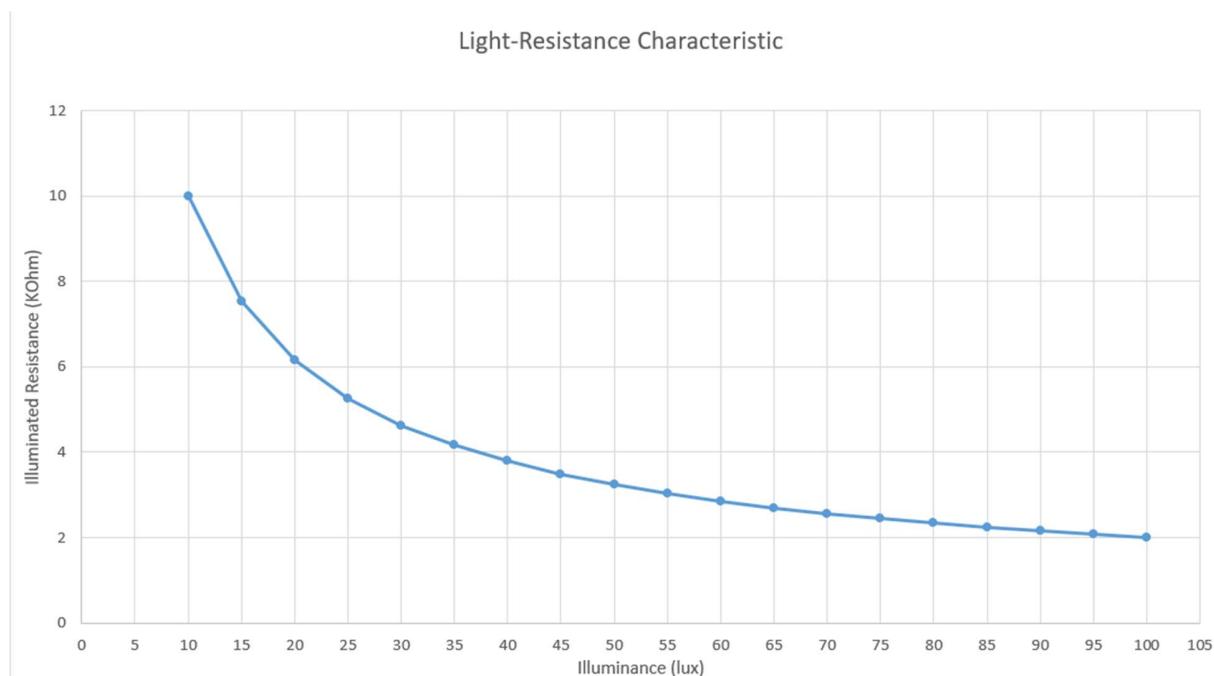
$$R_P = R_{P0} E_V^{-\gamma}$$

where:

- R_{P0} : Dark resistance (usually measured at 10lux)
- E_V : Illuminance
- γ : Transfer constant

Ta có bảng giá trị R ứng với Lux độ phân giải 5 LUX

No	E_V (lux)	R_P (KOhm)
1	10	10
2	15	7.52897957
3	20	6.155722067
4	25	5.265528817
5	30	4.634630568
6	35	4.160565552
7	40	3.789291416
8	45	3.489403886
9	50	3.241313193
10	55	3.032118131
11	60	2.852949766
12	65	2.697495012
13	70	2.561128518
14	75	2.440378081
15	80	2.332582479
16	85	2.235665124
17	90	2.14798005
18	95	2.068204488
19	100	1.995262315



Đặc tuyến ánh sáng-điện trở (Light-Resistance Characteristic) phác thảo bằng Excel

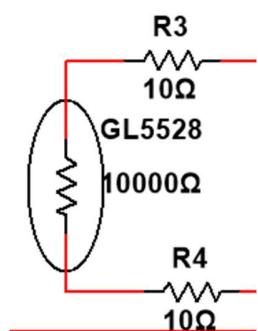
Nhận xét:

Đặc tuyến của LDR là phi tuyến trong khoảng [10 – 100] lux, điều này gây khó khăn khi xử lý tín hiệu đầu ra trong các mạch yêu cầu tuyến tính hóa dữ liệu.

Để khắc phục, cần mắc một điện trở song song với LDR nhằm giới hạn phạm vi thay đổi điện trở, từ đó tuyến tính hóa mối quan hệ giữa ánh sáng và điện áp (hoặc dòng điện) trong mạch đo.

Ngoài ra, việc mắc điện trở song song còn giúp giảm ảnh hưởng của nhiễu từ các mức ánh sáng rất thấp (trong vùng điện trở tối cao).

Mô phỏng mô phỏng LDR 2 dây (có điện trở dây dẫn là 10Ω):



b) Lựa chọn điện trở song song để tuyến tính hóa.

Dùng phương pháp 3 điểm:

$$\text{Ở mức ánh sáng L1 (10 lux): } Vml1 = \frac{RL1 \cdot RPa}{RL1 + RPa} * I$$

$$\text{Ở mức ánh sáng L21 (100 lux): } Vml2 = \frac{RL2 \cdot RPa}{RL2 + RPa} * I$$

$$\text{Ở mức ánh sáng LM (55 lux): } VmlM = \frac{RLM \cdot RPa}{RLM + RPa} * I$$

$$VmlM = \frac{Vml1 + Vml2}{2}$$

$$Rpa = \frac{RLM (RL1 + RL2) - 2 RL1 RL2}{RL1 + RL2 - 2 RLM} = - 0.595882385$$

Giá trị R_{Pa} âm là **không thực tế** trong mạch điện. Điều này xảy ra khi công thức tuyến tính hóa không áp dụng được với trường hợp đặc tuyến quá cong

Chọn $Rpa = 200$ Ohm tính sai số tối ưu

No	Ev (lux)	Rp (KOhm)	Rt(KOhm)	R//(Rp//Rt) (KOhm)
1	10	10	0.2	0.196078431
2	15	7.52897957	0.2	0.194824673
3	20	6.155722067	0.2	0.193706459
4	25	5.265528817	0.2	0.192681404
5	30	4.634630568	0.2	0.191726359
6	35	4.160565552	0.2	0.190826878
7	40	3.789291416	0.2	0.189973157
8	45	3.489403886	0.2	0.18915814
9	50	3.241313193	0.2	0.18837653
10	55	3.032118131	0.2	0.187624215
11	60	2.852949766	0.2	0.186897917
12	65	2.697495012	0.2	0.186194972
13	70	2.561128518	0.2	0.18551317
14	75	2.440378081	0.2	0.184850654
15	80	2.332582479	0.2	0.184205845
16	85	2.235665124	0.2	0.183577381
17	90	2.14798005	0.2	0.18296408
18	95	2.068204488	0.2	0.182364906
19	100	1.995262315	0.2	0.181778943

Viết phương trình đường thẳng có dạng:

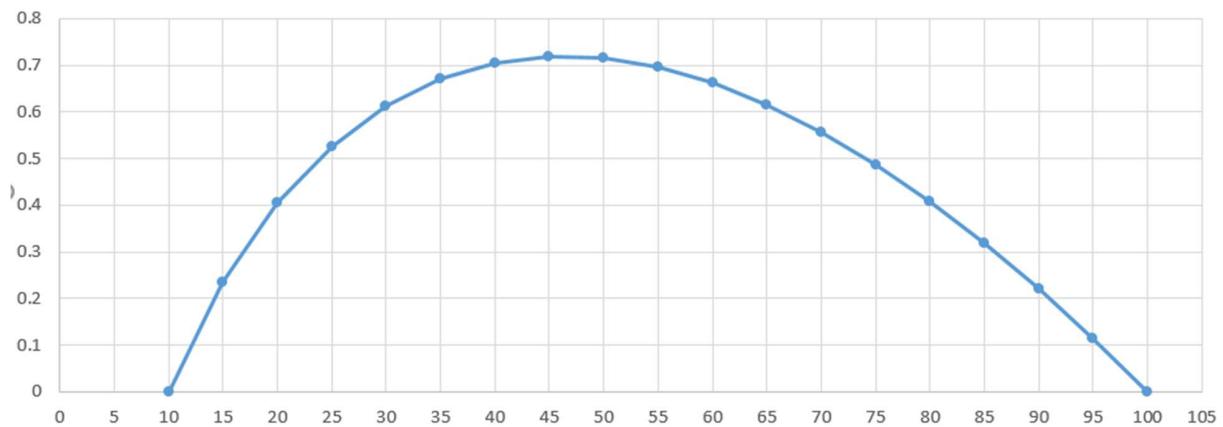
$$R/(eq) = (-0.000158883) * Ev + 0.197667263$$

Tìm sai số của điện trở song song tuyến tính theo công thức:

Sai số:
$$Error(\%) = \frac{(R_{\parallel(Eq)} - R_{\parallel})}{R_{\parallel}} \cdot 100\%$$

No	Ev (lux)	$R/(Rp/Rt)$ (KOhm)	$R/(eq)$ (Kohm)	Error (%)
1	10	0.196078431	0.196078433	8.3E-07
2	15	0.194824673	0.195284018	0.235773748
3	20	0.193706459	0.194489603	0.404294422
4	25	0.192681404	0.193695188	0.526145475
5	30	0.191726359	0.192900773	0.61254722
6	35	0.190826878	0.192106358	0.670492574
7	40	0.189973157	0.191311943	0.704723944
8	45	0.18915814	0.190517528	0.718651541
9	50	0.18837653	0.189723113	0.714835763
10	55	0.187624215	0.188928698	0.695263821
11	60	0.186897917	0.188134283	0.661519195
12	65	0.186194972	0.187339868	0.614890975
13	70	0.18551317	0.186545453	0.556447395
14	75	0.184850654	0.185751038	0.487087037
15	80	0.184205845	0.184956623	0.40757551
16	85	0.183577381	0.184162208	0.318572394
17	90	0.18296408	0.183367793	0.220651439
18	95	0.182364906	0.182573378	0.114316008
19	100	0.181778943	0.181778963	1.10598E-05

Error (%)



Nhận xét:

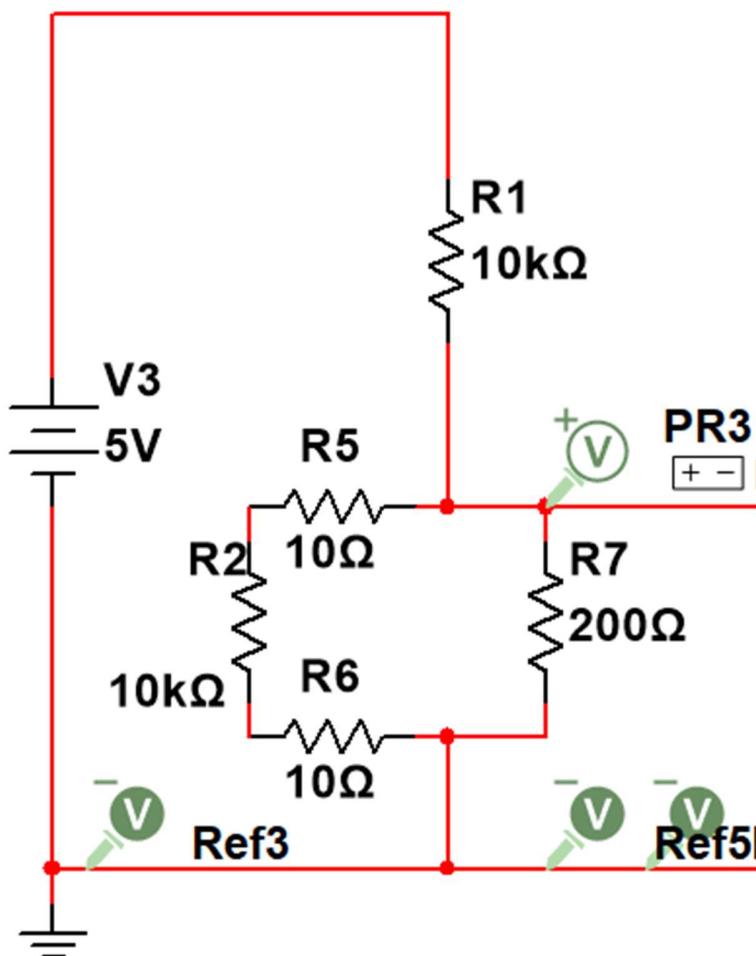
Sai số bắt đầu **rất nhỏ** có thể coi như gần bằng 0.

Sau đó, sai số tăng dần, đạt đỉnh ở khoảng giữa dải (0.7186%).

Sai số giảm dần khi tiến gần về cuối dải, gần như trở lại bằng 0

Tổng thể, sai số thấp (dưới 1%), nên phương pháp mắc điện trở song song được coi là tương đối hiệu quả trong việc tuyến tính hóa đường phi tuyến ban đầu.

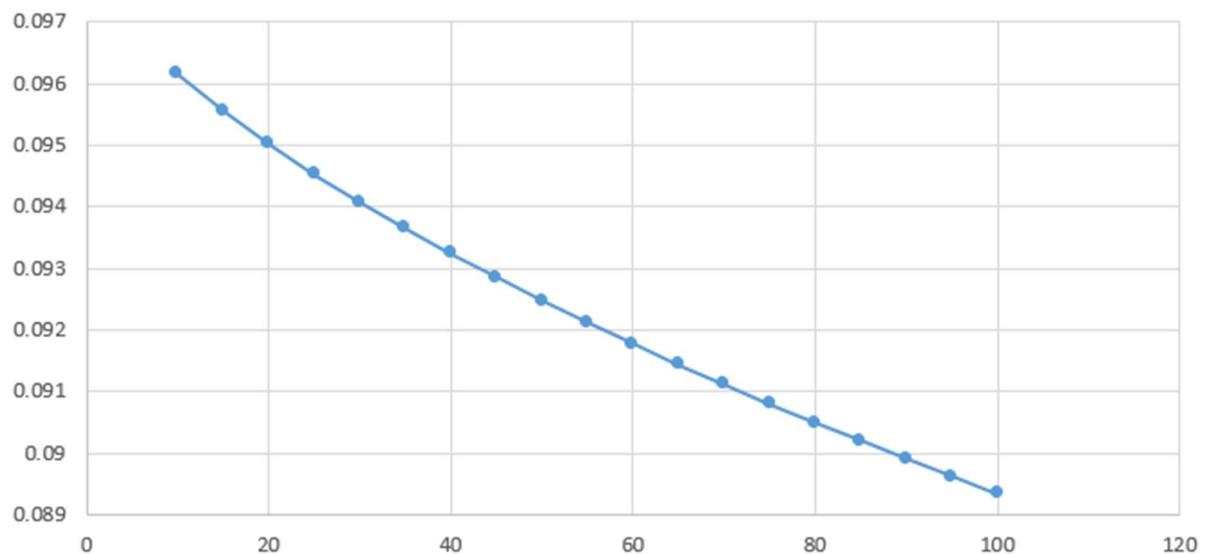
Mô phỏng Vm theo giá R2 (LDR):



Đặc tuyến của Vm sau khi có điện trở song song theo R//:

Ev (lux)	Rp (KOhm)	Rt(KOhm)	R//(Rp//Rt) (KOhm)	Error (%)	Vm
10	10	0.2	0.196086106	3.42954E-06	0.096157537
15	7.52897957	0.2	0.19483803	0.237316293	0.095557197
20	6.155722067	0.2	0.193726201	0.407023725	0.09502227
25	5.265528817	0.2	0.192708087	0.529778287	0.094532329
30	4.634630568	0.2	0.191760444	0.616846878	0.094076212
35	4.160565552	0.2	0.190868759	0.675256369	0.093646952
40	3.789291416	0.2	0.190023175	0.70977537	0.093239815
45	3.489403886	0.2	0.189216596	0.723835139	0.092851396
50	3.241313193	0.2	0.188443692	0.720013492	0.092479135
55	3.032118131	0.2	0.187700324	0.700312381	0.092121047
60	2.852949766	0.2	0.186983191	0.666327994	0.091775547
65	2.697495012	0.2	0.186289608	0.61936053	0.091441347
70	2.561128518	0.2	0.185617349	0.560488066	0.091117378
75	2.440378081	0.2	0.184964543	0.490617982	0.090802743
80	2.332582479	0.2	0.184329595	0.41052383	0.090496676
85	2.235665124	0.2	0.183711134	0.320872408	0.09019852
90	2.14798005	0.2	0.183107966	0.222244075	0.089907701
95	2.068204488	0.2	0.182519045	0.115148276	0.089623719
100	1.995262315	0.2	0.181943448	3.55981E-05	0.08934613

The relationship between light intensity (lux) and measured voltage (Vm)



c. Lựa chọn OPAMP sử dụng, mô phỏng OPAMP theo datasheet.

Lựa chọn OPAMP OPA188: Chọn Opamp Op-amp OPA 188 có độ lệch điện áp đầu vào rất thấp, thường 6uV. Điều này giúp giảm sai số ở ngõ ra do sự không lý tưởng ở đầu vào.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
OFFSET VOLTAGE					
V_{os}	Input offset voltage $T_A = -40^\circ\text{C} \text{ to } +125^\circ\text{C}$		± 6	± 25	μV
PSRR	Power-supply rejection ratio $V_S = 4 \text{ V to } 36 \text{ V}, T_A = -40^\circ\text{C} \text{ to } +125^\circ\text{C}$		± 0.03	± 0.085	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
	Long-term stability ⁽²⁾		± 0.075	± 0.3	$\mu\text{V/V}$
INPUT BIAS CURRENT					
I_B	Input bias current $V_{CM} = V_S / 2$ $T_A = -40^\circ\text{C} \text{ to } +125^\circ\text{C}$		± 160	± 1400	pA
				± 18	nA
I_{os}	Input offset current $T_A = -40^\circ\text{C} \text{ to } +125^\circ\text{C}$		± 320	± 2800	pA
				± 6	nA

Từ datasheet ta có các thông số không lý tưởng sau:

$$V_{os} = 6\text{uV}$$

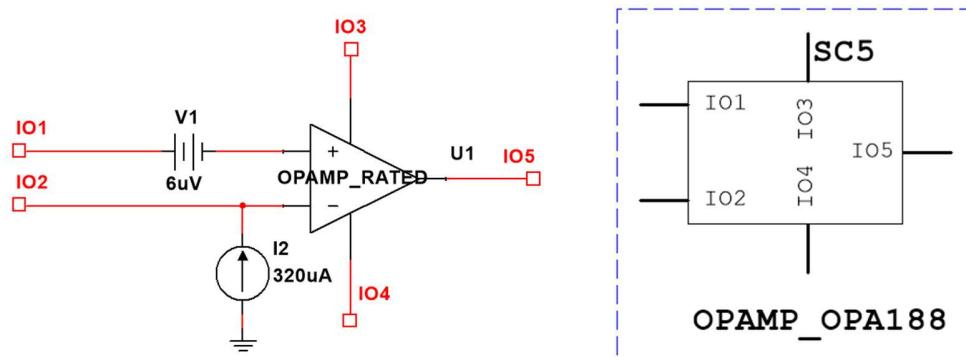
$$I_B = 160\text{pA}, I_{os} = 320\text{pA}$$

Tính toán I^+ , I^- :

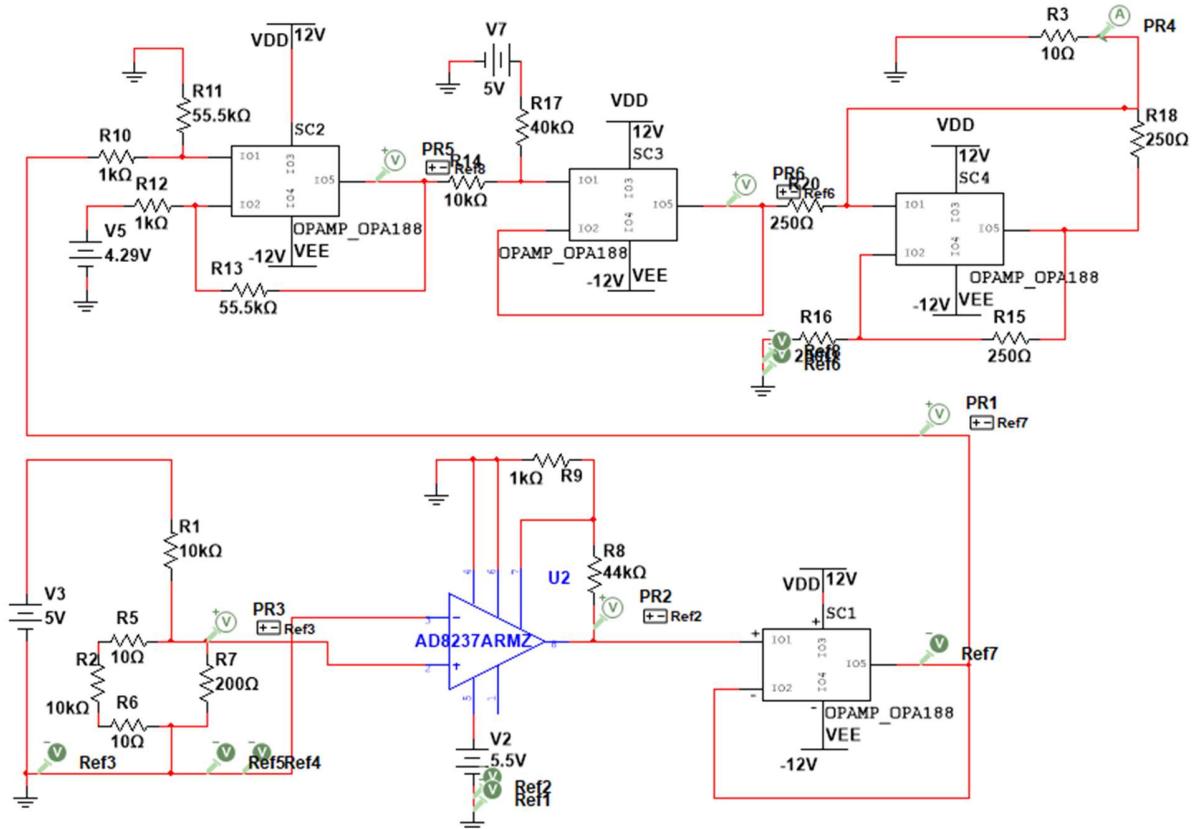
$$I_B = \frac{I^+ + I^-}{2}; \quad I_B = |I^+ - I^-|$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I^+ = 320\text{pA}, & I^- = 0\text{pA} \\ I^+ = 0\text{pA}, & +I^- = 320\text{pA} \end{cases}$$

Mô phỏng OPA188 với trạng thái không lý tưởng;



Tổng quan mạch đã thiết kế:



Lý thuyết và công thức tính toán cho mỗi tầng:

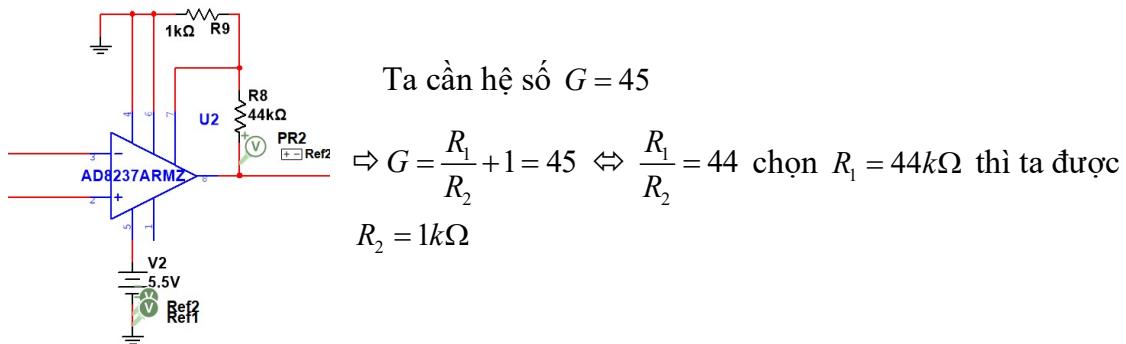
- Stage 1: Khối khuếch đại thuật toán (Operational Amplifier):

Nhận thấy: Tín hiệu quá nhỏ [**0.09537894 V : 0.09740927 V**] có thể bị nhiễu lấn át, hoặc hệ thống xử lý (như ADC hoặc bộ vi điều khiển) không đủ độ phân giải để nhận biết sự thay đổi trong tín hiệu. Do đó ta cần khuếch đại tín hiệu lên.

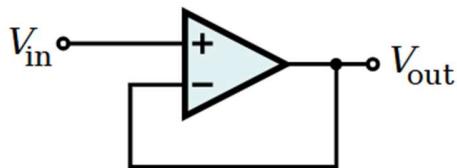
Mục tiêu: Dùng mạch khuếch đại

thuật toán AD8237ARMZ khuếch đại tín hiệu V_m với hệ số $G = 45$

Theo datasheet của AD8237ARMZ ta có : $V_{out} = G(V_{+IN} - V_{-IN}) + V_{ref}$ với $G = \frac{R_1}{R_2} + 1$



- Stage 2: Khối đệm (Buffer):



Bộ đệm thường có:

+ Trở kháng đầu vào cao, trở kháng đầu ra thấp

+ Hệ số khuếch đại áp bằng 1

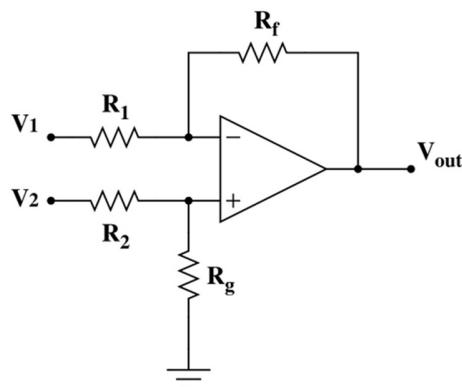
=> Chức năng chính của bộ đệm là tách biệt mạch nguồn tín hiệu với mạch tải.

Ảnh hưởng Vos lên ngõ ra:

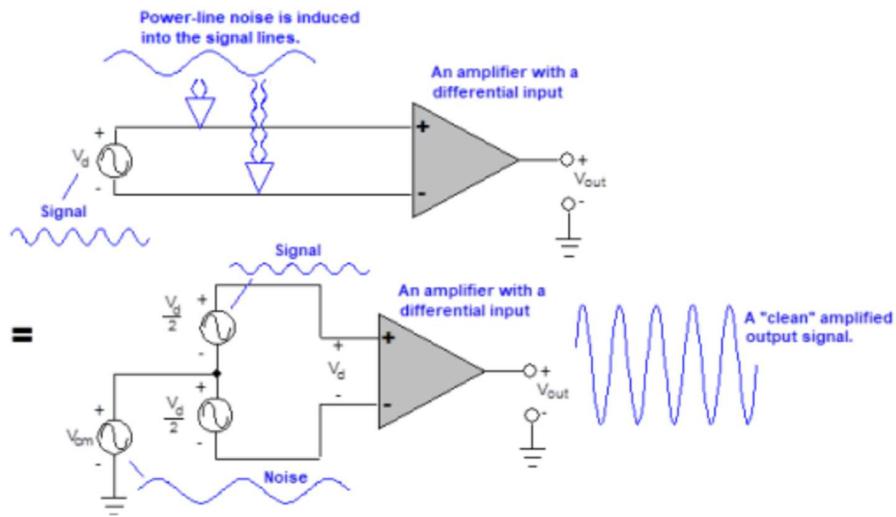
$$V_{out} = V_{in} \pm V_{os}$$

$$\Leftrightarrow V_{out} = V_{in} \pm 6\mu V$$

- Stage 3: Khối khuếch đại vi sai (*differential amplifier*):



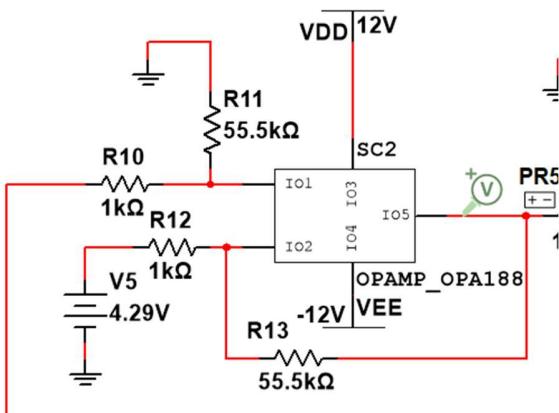
Khuếch đại hiệu tín hiệu vi sai: Chỉ khuếch đại phần chênh lệch giữa hai đầu vào V1 và V2 giúp loại bỏ nhiễu.



Khi chọn:

$$\frac{Rf}{R1} = \frac{Rg}{R2}$$

$$\Rightarrow V_{out} = \frac{Rf}{R1} * (V_{in} - V_{ref})$$



Ta có output từ khối khuếch đại thuật toán có điện áp từ 4.29 V - 4.38V

Để đưa khoảng điện áp đó về mức 0 - 5V

Ta dùng mạch khuếch đại vi sai với $G(V_{in} - V_{ref}) \Leftrightarrow G(V_{in} - 4.29)$

Lúc đó ngõ ra của mạch vi sai sẽ là khoảng điện áp $G(4.38 - 4.29) = 5 \Rightarrow G = 55.5$

Để tương ứng 0 - 5V thì ta tính được $G = 55.5$

Từ $G = 55.5$ ta có các điện trở tương ứng $R_f = 55.5k\Omega$ và $R_g = 1k\Omega$

Ảnh hưởng Vos lên ngõ ra:

- Xét $V_{os} = 0$ (lý tưởng):

$$\begin{aligned}V_{out} &= 55.5 * (V_{in} - V_{ref}) \\ \Leftrightarrow V_{out} &= 55.5(V_{in} \pm 6uV - 4.29) \\ \Leftrightarrow V_{out} &= 55.5(V_{in} - 4.29) \pm 333uV\end{aligned}$$

Xét $V_{in} = V_{ref} = 0$ V (Không lý tưởng):

$$\Delta V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) V_{os} = 339uV$$

$$V_{out} = 55.5(V_{in} - 4.29) \pm 333uV \pm 339uF$$

- Xét ảnh hưởng Ios và Ib lên ngõ ra:

$$\Delta V_{out} = I - * R = 16.5mV$$

- Tổng ảnh hưởng V_{os} , I_b và I_{os} :

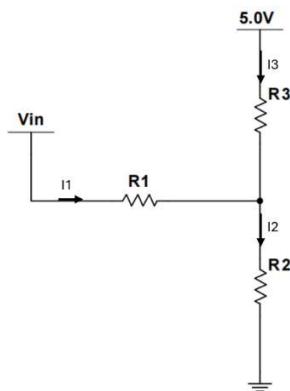
$$V_{out} = 55.5(V_{in} - 4.29) \pm 333uV \pm 339uF \pm 16.5mV$$

$$16.5mV \gg 333uV$$

$$16.5mV \gg 339uF$$

$$\Rightarrow V_{out} = 55.5(V_{in} - 4.29) \pm 16.5mV$$

- Stage 4: Khởi chuyển đổi 0 – 5V sang 1 – 5V



Áp dụng mạch phân áp dạng sao như hình bên trên.

Gọi I_1, I_2, I_3 là dòng điện lần lượt đi qua R_1, R_2, R_3

Gọi V_o là điện áp tại điểm giữa R_1, R_2, R_3 ta có định giá trị $R_3 = 40k\Omega$

$$I_1 = \frac{V_{in} - V_o}{R_1} \quad I_2 = \frac{V_o}{R_2} \quad \text{và} \quad I_3 = \frac{5 - V_o}{R_3}$$

Mà ta có $I_2 = I_1 + I_3$

$$\Leftrightarrow \frac{V_o}{R_2} = \frac{V_{in} - V_o}{R_1} + \frac{5 - V_o}{R_3} \quad (1)$$

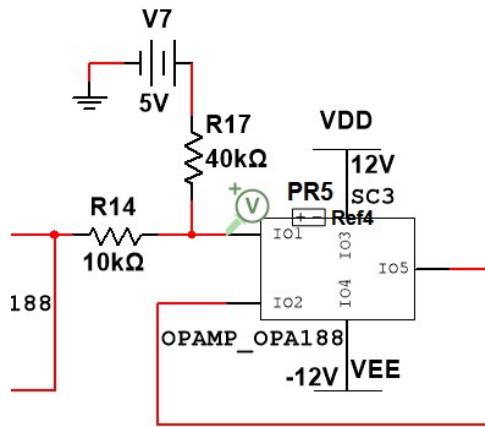
Với $V_{in} = 0V \rightarrow V_o = 1V$ thay vào (1) ta có :

$$\Leftrightarrow \frac{1}{R_2} = \frac{0 - 1}{R_1} + \frac{5 - 1}{40} \quad (2)$$

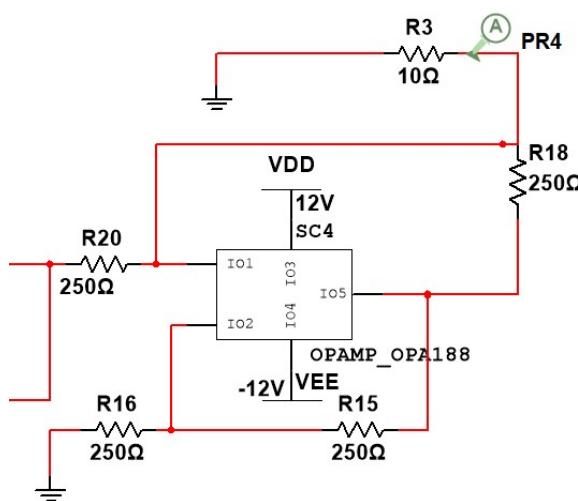
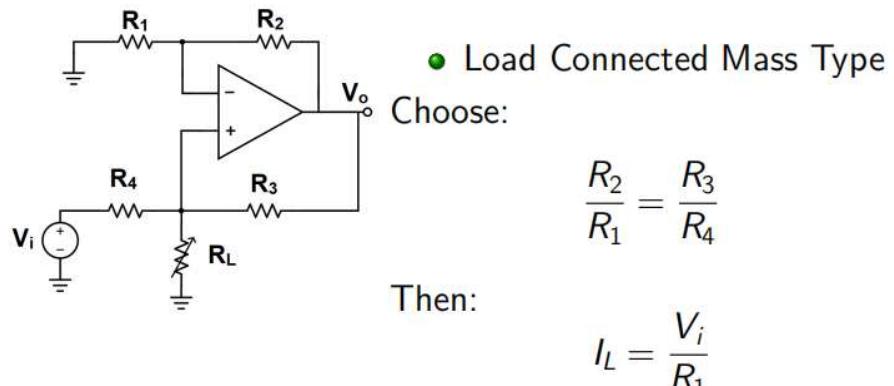
Với $V_{in} = 5V \rightarrow V_o = 5V$ thay vào (1) ta có :

$$\Leftrightarrow \frac{5}{R_2} = \frac{5 - 5}{R_1} + \frac{5 - 5}{40} \quad (3)$$

Từ (1) và (2) Ta giải được $R_1 = 10k\Omega$ và $R_2 = 0\Omega$



- Stage 5: Khối chuyển đổi V-I



Ta có điện áp đầu vào tức V_i có giá trị trong khoảng 1 – 5V

$$I_L = \frac{V_i}{R} \text{ để } I_L \text{ có giá trị trong khoảng } 4 - 20 \text{ mA} \text{ tương ứng } R = 250\Omega$$

- Xét ảnh hưởng của V_{os} lên ngõ ra:

$$\Delta V = \left(1 + \frac{250}{250}\right) \times V_{os}$$

$$\Leftrightarrow \Delta V = \pm 12 \mu V$$

- Xét ảnh hưởng của I_b , I_{os} lên ngõ ra:

$$\Delta V = I \times 250$$

$$\Leftrightarrow \Delta V = \pm 80 \mu V$$

Tổng ảnh hưởng của các thông số không lý tưởng lên kết quả ngõ ra:

$$V_{out} = 16.13(V_{in} - 4.0188) \pm 5.1616mV \pm 80 \mu V \pm 12 \mu V$$

Ta có:
 $16.5mV >> 80\mu V$
 $16.5mV >> \pm 12\mu V$

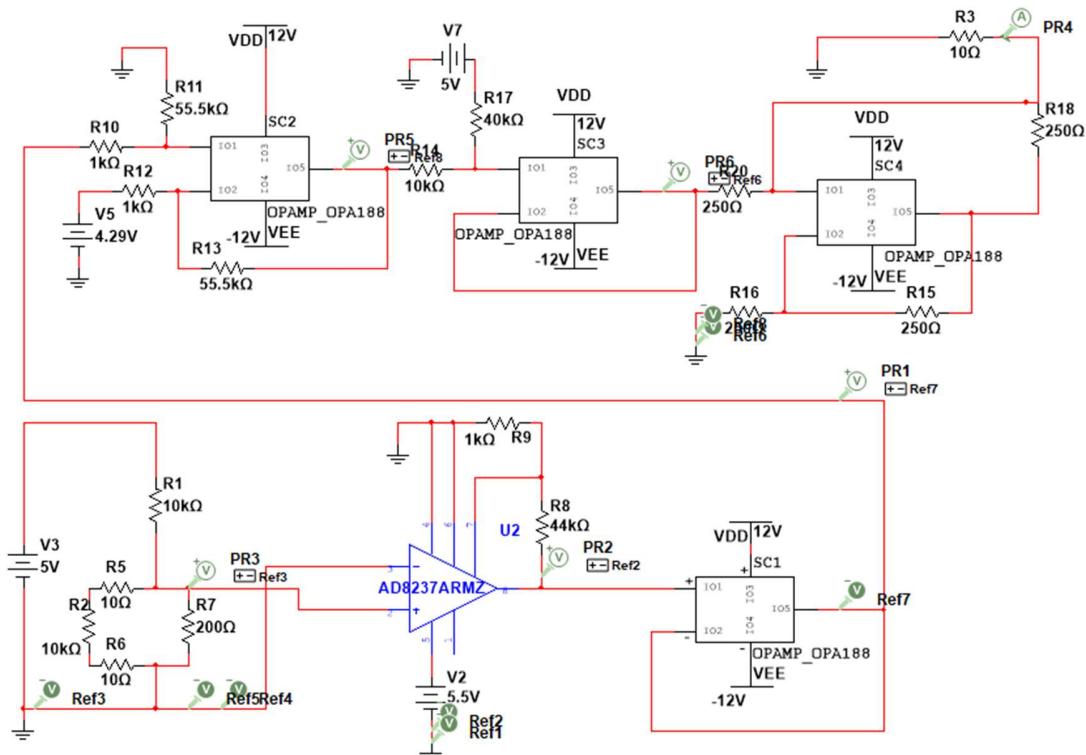
$$\Rightarrow V_{out} = 55.5(V_{in} - 4.29) \pm 16.5mV$$

- Nhận xét:

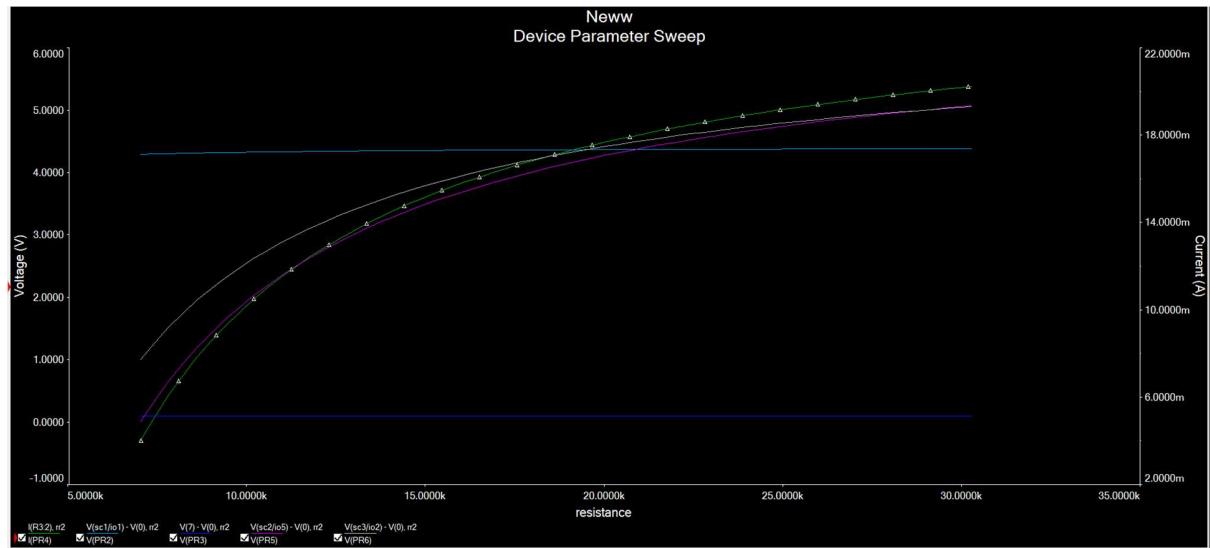
$$\Delta I = \frac{\Delta V}{R_1} = \frac{16.5mV}{250} = \pm 0.066mA$$

$$Error(max) = \left(\frac{\Delta I}{I_{min}} \right) \times 100 = \left(\frac{0.066mA}{4mA} \right) \times 100 = 1.65\%$$

Ta có: Sai số nhỏ hơn 2% \rightarrow Chọn Opamp Op-amp OPA 188 có độ lệch điện áp đầu vào rất thấp, thường 6uV. Điều này giúp giảm sai số ở ngõ ra do sự không lý tưởng ở đầu vào.



Kết quả mô phỏng:



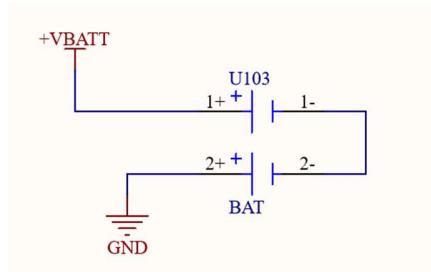
R(LDR)	Vm V(PR3)]	Vmx45 V(PR2)]	V (0 - 5)V V(PR5)]	V(1 - 5)V V(PR6)]	IL I(PR4)]
7010	0.095378505	4.290369909	0.003442149	1.002094264	0.004008
7695	0.095608851	4.300734283	0.578494053	1.462123564	0.005848
8380	0.095802485	4.309446844	1.061897518	1.848836086	0.007395
9065	0.095967537	4.31687333	1.473945083	2.178465417	0.008714
9750	0.096109899	4.323278928	1.82935024	2.462782034	0.009851
10435	0.09623395	4.328860607	2.13904142	2.710528445	0.010842
11120	0.09634301	4.333767726	2.411305602	2.928334055	0.011713
11805	0.09643964	4.338115599	2.652540906	3.121317221	0.012485
12490	0.096525851	4.341994675	2.867765724	3.293492551	0.013174
13175	0.096603242	4.345476897	3.060971622	3.448053211	0.013792
13860	0.096673101	4.3486202	3.235373189	3.587570804	0.01435
14545	0.096736476	4.35147177	3.393588301	3.714139576	0.014856
15230	0.09679423	4.354070418	3.537770459	3.82948228	0.015318
15915	0.096847079	4.356448366	3.669707365	3.935029042	0.01574
16600	0.096895623	4.358632583	3.790895448	4.031976971	0.016128
17285	0.096940366	4.360645819	3.902596842	4.12133575	0.016485
17970	0.096981739	4.362507393	4.00588353	4.20396294	0.016816
18655	0.097020108	4.364233821	4.101671835	4.280591581	0.017122
19340	0.097055789	4.365839305	4.190749716	4.351852025	0.017407
20025	0.097089056	4.367336122	4.273798443	4.418289272	0.017673
20710	0.097120144	4.368734946	4.351410103	4.48037698	0.017921
21395	0.097149261	4.370045094	4.424101706	4.538528745	0.018154
22080	0.09717659	4.371274738	4.492326724	4.593107335	0.018372
22765	0.097202289	4.372431079	4.556484565	4.64443227	0.018578
23450	0.097226501	4.37352048	4.616928395	4.692786073	0.018771
24135	0.09724935	4.374548592	4.673971639	4.73841948	0.018954
24820	0.097270949	4.375520444	4.727893424	4.781555783	0.019126
25505	0.097291398	4.376440532	4.778943139	4.822394492	0.019289
26190	0.097310785	4.377312884	4.827344297	4.86111441	0.019444
26875	0.097329192	4.378141121	4.873297808	4.897876261	0.019591
27560	0.097346692	4.378928506	4.916984751	4.932824905	0.019731
28245	0.097363349	4.379677991	4.958568788	4.966091269	0.019864
28930	0.097379223	4.380392246	4.998198187	4.997793963	0.019991
29615	0.097394368	4.381073699	5.036007598	5.028040705	0.020112
30300	0.097408833	4.381724559	5.072119585	5.056929543	0.020228

II. Thiết kế mạch in PCB

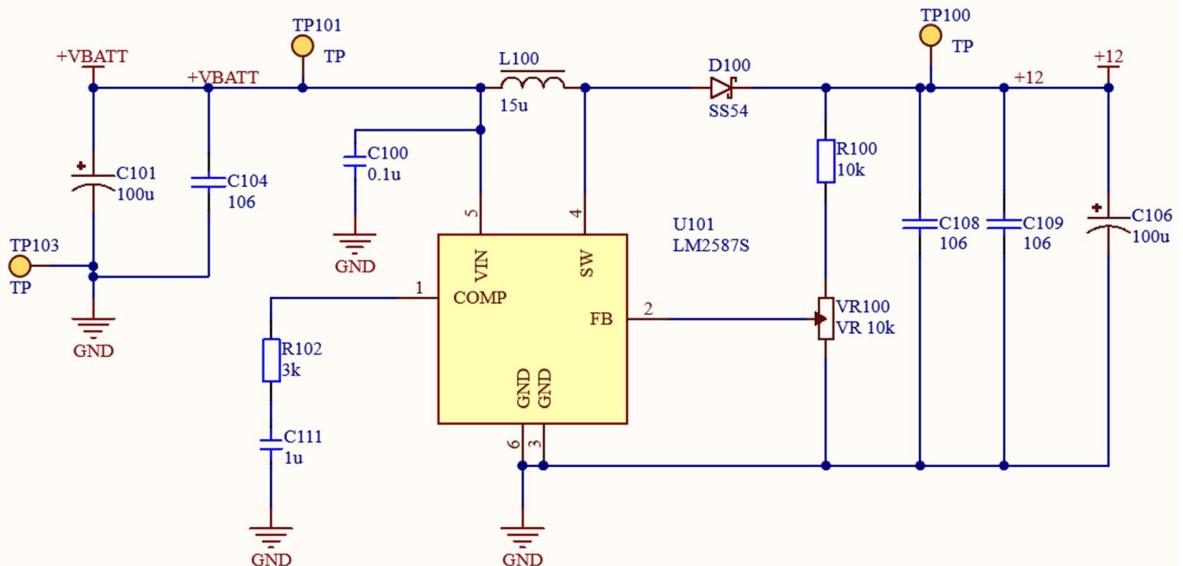
1. Mạch nguyên lý:

a) Sơ đồ khối hệ thống nguồn:

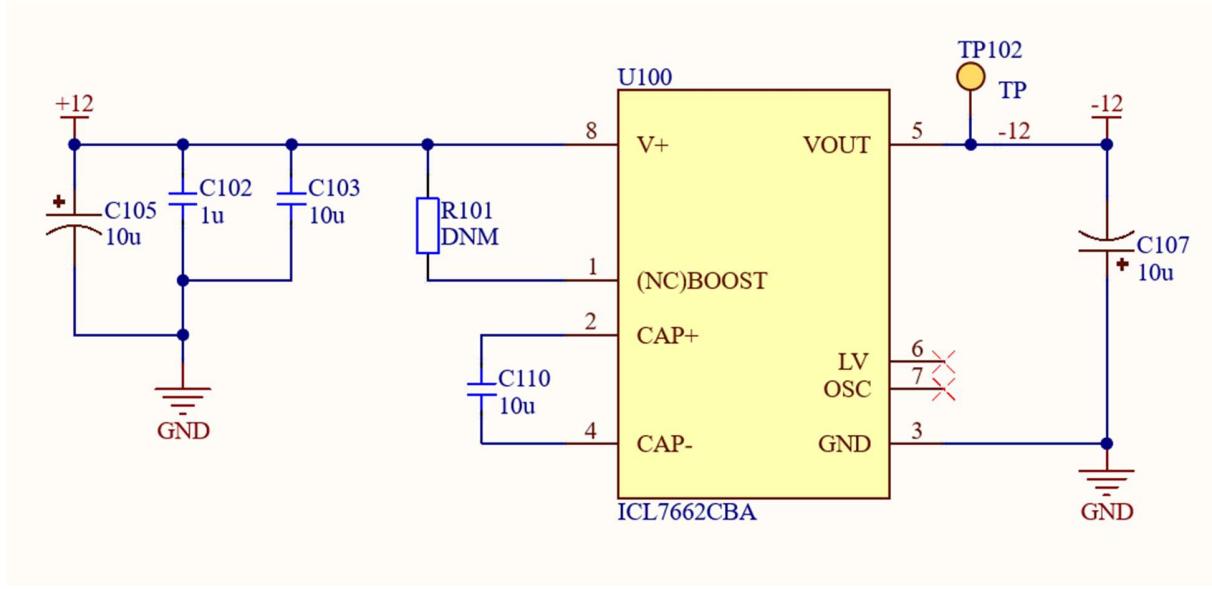
Nguồn đầu vào: Hai pin **18650 (3.7V, 2200mAh)** nối tiếp, tổng điện áp đầu vào là **7.4V**.



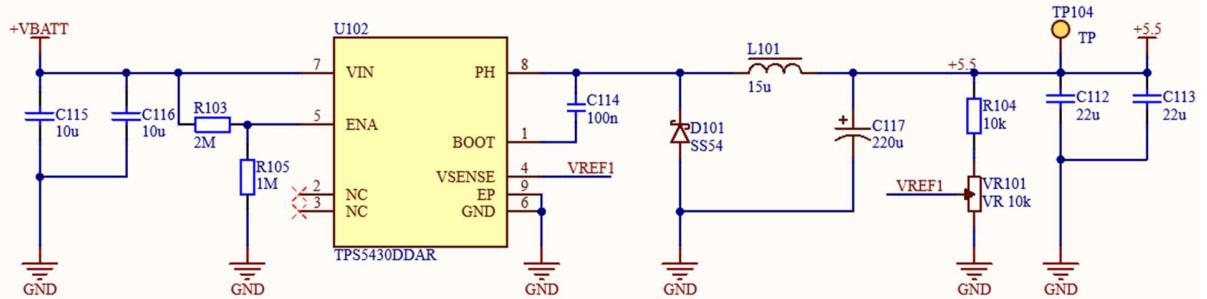
Tăng áp (Boost): IC LM2587S: Chuyển từ 7.4V lên 12V, đảm bảo dòng cấp đủ cho mạch op-amp.



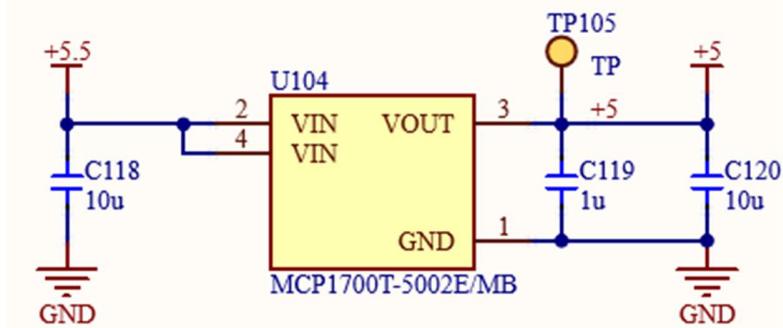
Đảo áp: IC ICL7667: Đảo nguồn từ +12V thành -12V, tạo điện áp đối xứng ±12V cho op-amp.



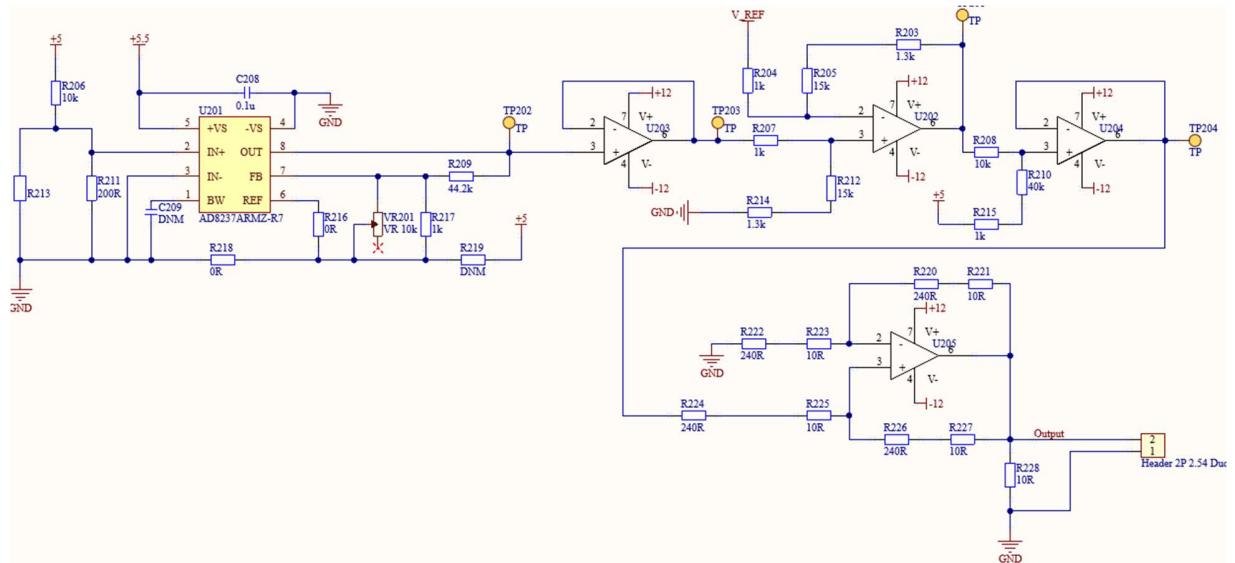
Giảm áp (Buck): IC TPS54030DDAR: Giảm từ 7.4V xuống **5.5V**, ổn định nguồn cấp cho các mạch phụ.



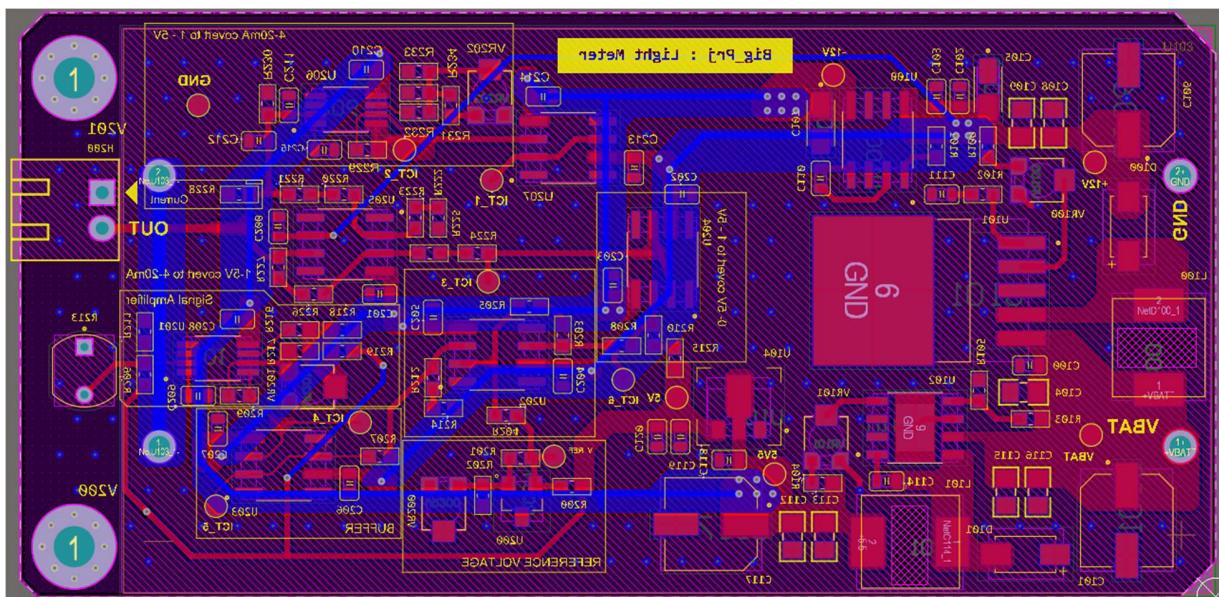
Ôn áp tuyến tính: IC MCP1700T-5002E/MB: Giảm áp từ 5.5V xuống **5V**, tạo nguồn sạch và ổn định hơn cho các thành phần nhạy cảm như vi điều khiển hoặc cảm biến.

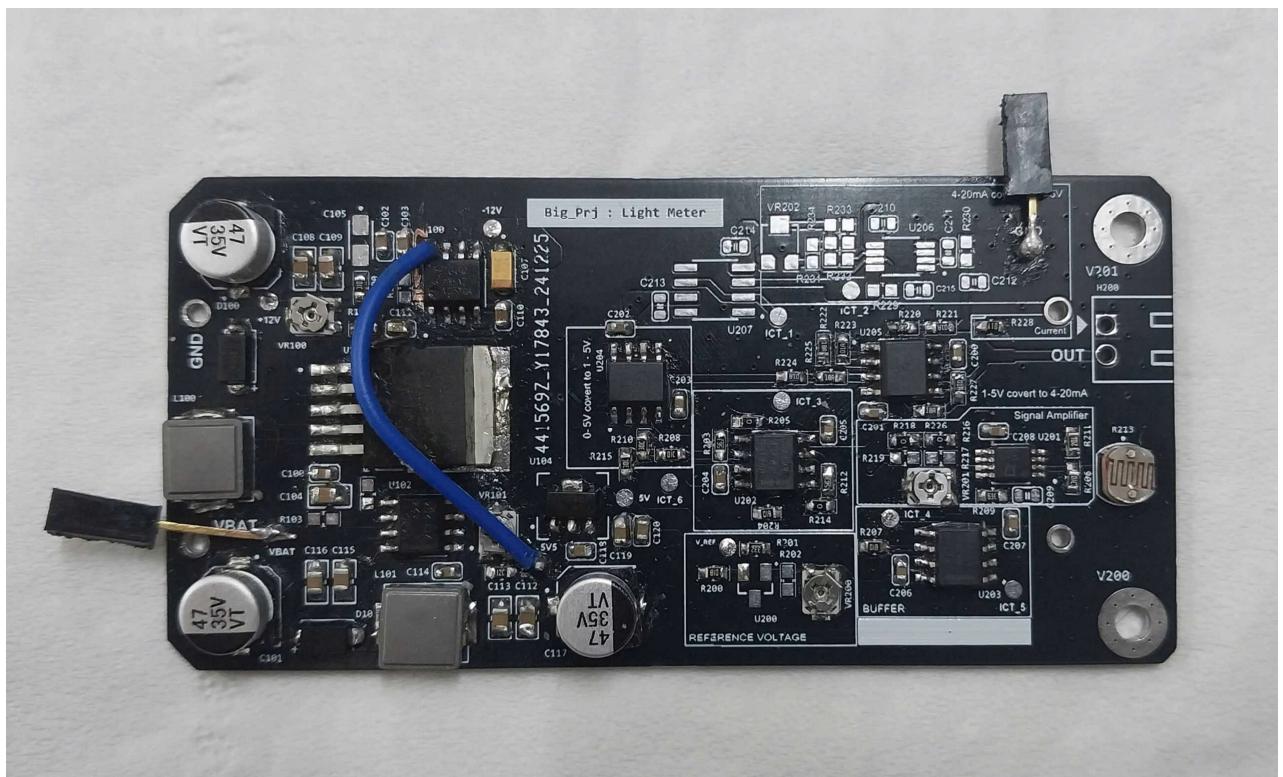
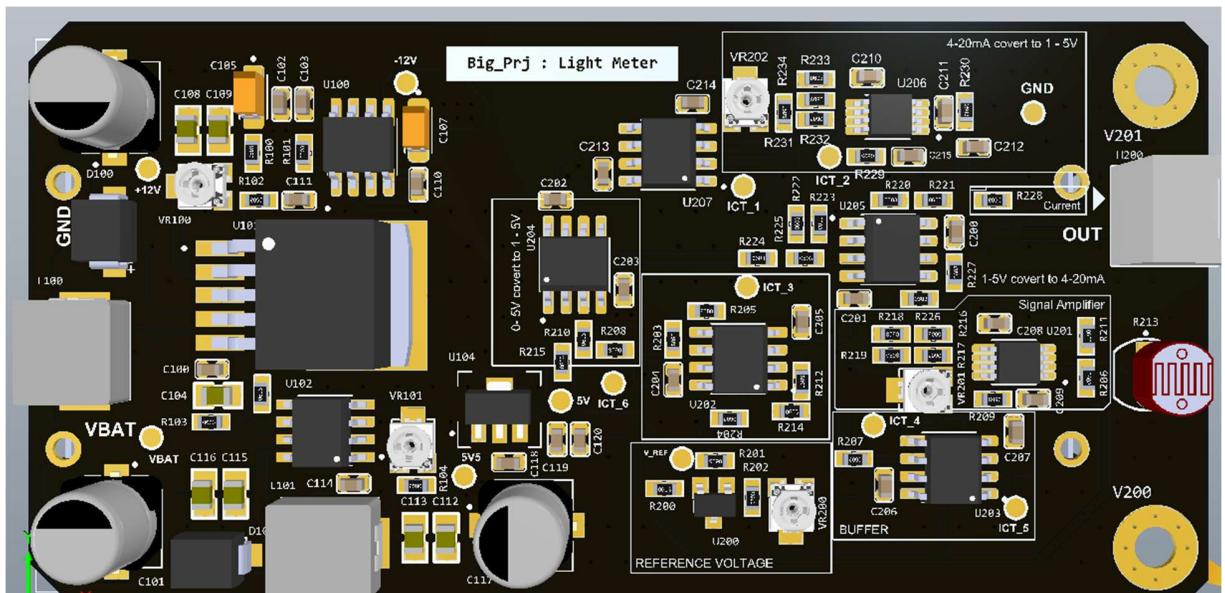


b) Mạch chuyển đổi tín hiệu cảm biến:



2) Mạch PCB:





III. Kiểm tra thực tế và đánh giá

1) Kiểm tra tần số khồi nguồn:

Kết quả đo:

Khồi	Điện áp đầu vào (V)	Điện áp đầu ra (V)	Ghi chú
Boost	7.4V	12.0V	Đạt yêu cầu
Đảo áp	5.5V	-5.5V	Đạt yêu cầu
Buck	7.4V	5.5V	Đạt yêu cầu
Ôn áp	5.5V	5.0V	Ôn định.

2) Kiểm tra và đánh giá tín hiệu ngõ ra:

No	Ev (lux)	R(LDR)	IL (Mô phỏng)	IL (thực tế)	Vm x 45 (MP)	Vm x 45(thực tế)	Error(%)
1	10	30.3	0.020227574		4.38172456	4.342	-0.9066
2	15	25.77	0.019350322		4.37678347		
3	20	20.44	0.017825446		4.36819466	4.335	-0.75992
4	25	17.3	0.016492722		4.36068814	4.325	-0.81841
5	30	16.1	0.015847924		4.35705634		
6	35	13.96	0.014427111		4.34905367	4.327	-0.50709
7	40	13.6	0.014144847		4.34746382	4.326	-0.49371
8	45	12.6	0.013277576		4.34257895	4.325	-0.4048
9	50	11.8	0.014427111		4.33808566		
10	55	11	0.011568277		4.33295139		
11	60	10.46	0.010875753		4.32905077	4.32	-0.20907
12	65	9.4	0.009290167		4.32012002	4.315	-0.11852
13	70	8.97	0.008542629		4.31590953		
14	75	8.72	0.008074941		4.31590953		
15	80	8.24	0.007099461		4.30778094		
16	85	7.96	0.006477538		4.30427798		
17	90	7.81	0.006126515		4.30230085		
18	95	7.21	0.004580617		4.29359364		
19	100	7.01	0.00400827		4.29036991	4.298	0.17784