

鉄腕アトムは半導体部品で構成され創られています。
鉄腕アトムの賢い電子の目は太陽の光を吸収して
光エネルギーを電気エネルギーに変換します。
鉄腕アトムの賢い電子の目は太陽電池でもあります。
賢い電子の目は半導体で造られます。

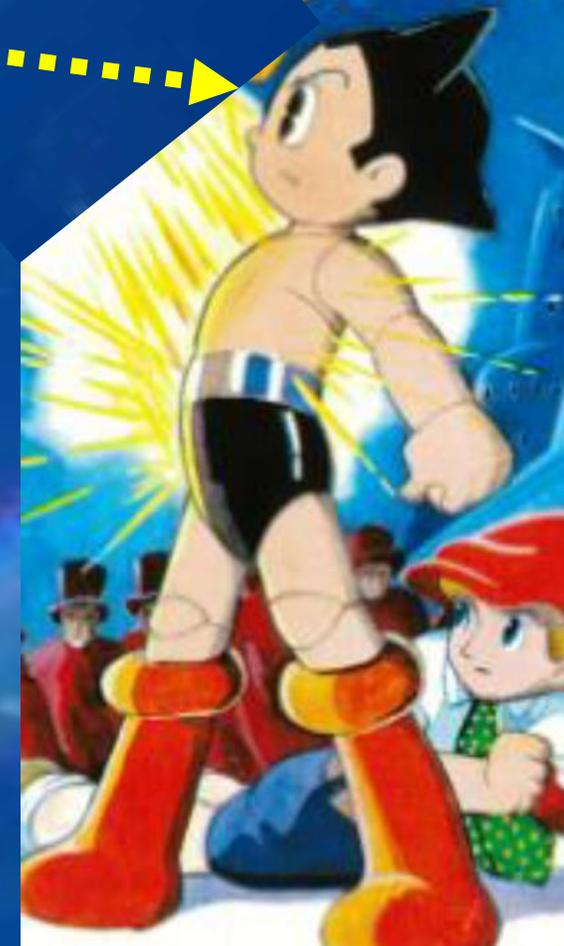
半導体とは？

2024 02 01 半導体とは？萩原良昭.pdf

2024 02 01 半導体とは？萩原良昭.mp4

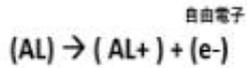
<http://www.aiplab.com>

<https://locomtec.jp/萩原aips研究所>



半導体とは？

●金属（アルミ等）は電気を通す。



電氣的に中性なアルミ原子（Al）から光や常温の熱で、自由電子(e-)が飛び出して自由にアルミの原子の塊の中を動きまわる。

●絶縁体（ガラスやダイヤモンド等）では原子内引力が強く、軌道電子が逃げる事ができず、絶縁体には自由電子(e-)がない。

●半導体（シリコン等）も引力が強く軌道電子が逃げる事があまりできない。自由に動ける電子(e-)が少ない。しかし不純物原子（ボロンやヒ素）を加えると、自由電子(e-)、またはホール(Si+)が生まれ、自由に半導体の中を動きまわり電気を通す。不純物原子濃度は制御可能。

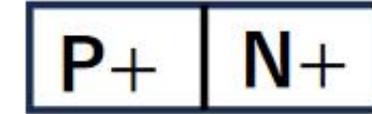
(1) Diode before 1948



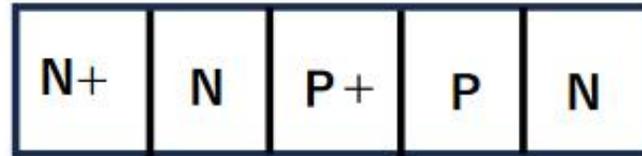
(2) Bell Lab, 1948 Bip Transistor



(3) Esaki Diode



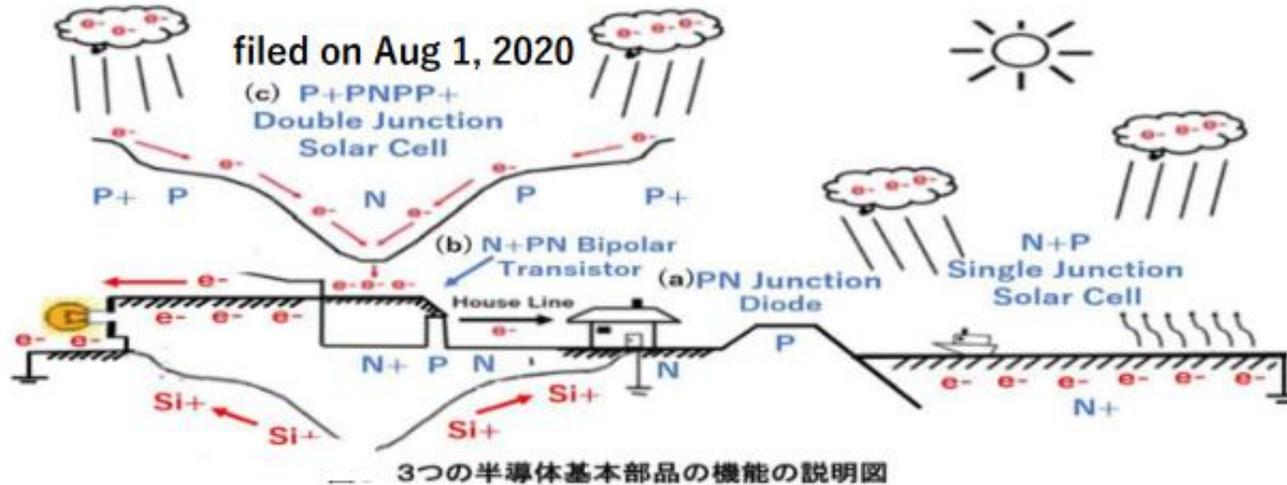
(4) Sony, Bip Transistor in 1950s



(5) Sony, Photodiode in 1975



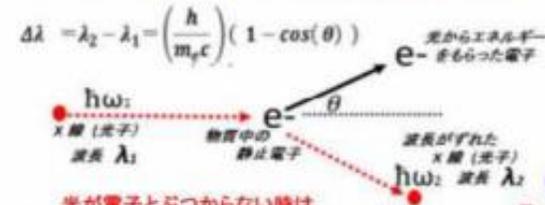
JPA2020-131313



(a)堤防としてのPN接合、(b)水門としてのN+PN接合、(c)ダムとしてのP+PNPP+接合。

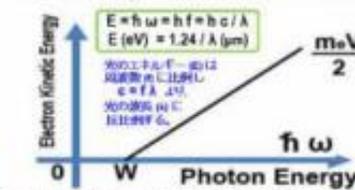
●光は波でもあり、また粒子(光子)でもある (Albert Einstein 1900)

- 玉突きと同じ古典物理モデルで記述できる。
- 反射光の角度と波長の関係から電子の質量が求まる！



光が電子とぶつからない時は $\theta=0$ で光は直進し波長の変化はない。

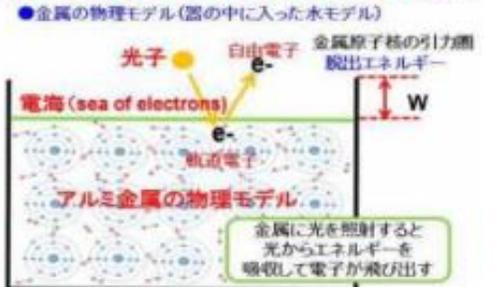
光の速度 $C = 2.99792458 \times 10^{10}$ cm/sec
 Plank 定数 $h = 6.62606957 \times 10^{-34}$ Joule*sec
 電子の質量 $m_e = 9.10938291 \times 10^{-31}$ kg



Work Function (W)の値から金属の種類が判明する。

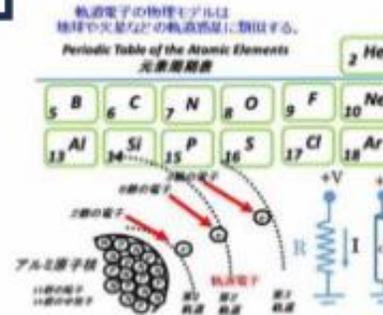


(脱出エネルギー) = 半導体の Energy Gap
 For Silicon, $E_g = 1.10$ eV and $\lambda = 1.12 \mu m$



●原子構造(原子核と電子)と太陽系(太陽と惑星)の類似

- アルミ原子(中性) $_{13}Al$ = アルミイオン $(Al^+)_{13}$ + 自由電子 (e^-)
- シリコン原子(中性) $_{14}Si$ = シリコンイオン $(Si^+)_{14}$ + 自由電子 (e^-)
- りん原子(中性) $_{15}P$ = りんイオン $(P^+)_{15}$ + 自由電子 (e^-)
- ボロンの原子(中性) $_{5}B$ + 自由電子 (e^-) = ボロンイオン $(B^+)_{5}$



●自由電子は当然空間を自由に浮遊し移動する。しかし、結晶体の中でも、結晶体の原子核の引力圏の外では自由に電子は浮遊することができる。

●シリコン結晶体では、電子を1つ失ったシリコンイオン (Si^+) は隣接する中性のシリコン原子から電子を1つ盗み、中性にもどる。その電子を盗まれた、シリコンイオン (Si^+) は、また別の中性のシリコン原子から電子を盗む。ホールはこうして移動する。

P型半導体の物理モデル



Holeが主役

N型半導体の物理モデル



電子が主役

2024-01-31 02:12 に uchiyama@aiplab.com さんは書きました:

> 萩原先生

>

> 素人目にみて質問があります。

>

> N(ネガティブ)型半導体は、

> シリコンより電子数が多いリンなどを添加すると、共有結合しているシリコンに
関与しない自由に動ける自由電子が発生。

>

> P(ポジティブ)型半導体は、

> シリコンより電子数が少ないホウ素などを添加すると、共有結合しているシリコンの
電子が不足し

> 損ができ、ホールが生まれるため、電子が移動することが出来る。

>

> 塩か砂糖か。ここまでは理解しました。

>

> N形に添加する素材は周期表で見るシリコン(14)の右隣にあるリン(15)であるのに対
し、

> 何故P型に添加する素材は周期表で見るシリコン(14)の左隣にあるアルミニウム(13)
を使用しないのでしょうか。

>

> リン(15)以外なら何故ヒ素(33)????

> 何故ホウ素(5)とインジウム(49)????

>

> ほかの素材ではだめなのか。 ← OKです。

>

> 遠い昔にいろいろ試して

> N型の場合はヒ素・リンが相性がよく、

> p型の場合はホウ素・インジウムの相性が良かった

>

> ということでしょうか? ← その通りです。1948年にトラジスタが発明されて75年になりますが、

> 宜しくお願い致します。

>

> 内山

正確には一番外側の軌道の中の電子数

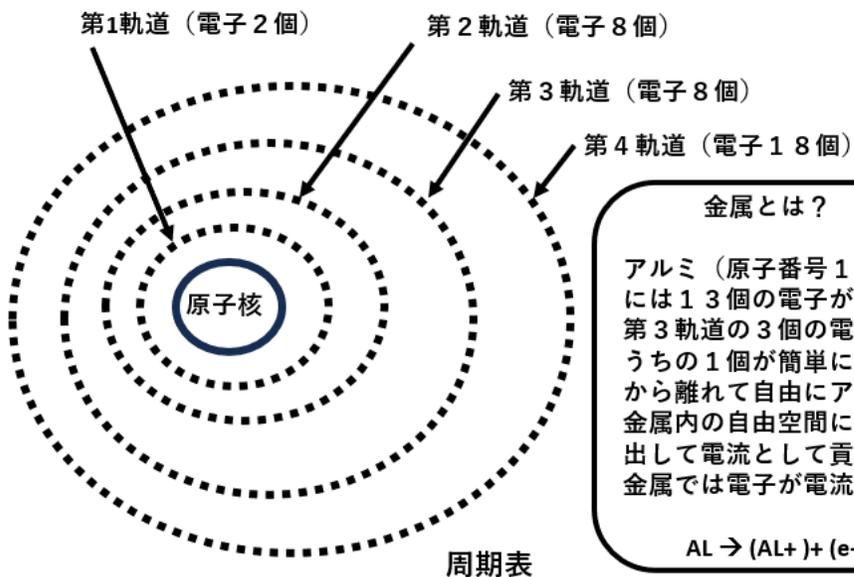


プラスの電荷（電子が不足している粒子のホールとして）が移動できる。

アルミも可能です。しかし、アルミはシリコン結晶の中を簡単に移動する性質があるので電気特性が不安定になるので使用されていません。

その通りです。1948年にトラジスタが発明されて75年になりますが、今ではいろいろな結晶だけでなく薄膜半導体材料の研究が注目されています。

原子の構造



金属とは？

アルミ（原子番号13）には13個の電子がある。第3軌道の3個の電子のうちの1個が簡単に軌道から離れて自由にアルミ金属内の自由空間に飛び出して電流として貢献する。金属では電子が電流となる。

AL → (AL+) + (e-)

- 第14族の炭素原子（C）の結晶体のダイヤモンドは透明で光を通すことができる。原子核の引力が強くて軌道電子が簡単に原子から飛び出せない。ダイヤモンドの中は自由電子が不在で電流が流れない。電気を通さないなので、絶縁体と呼ばれる。

第14族

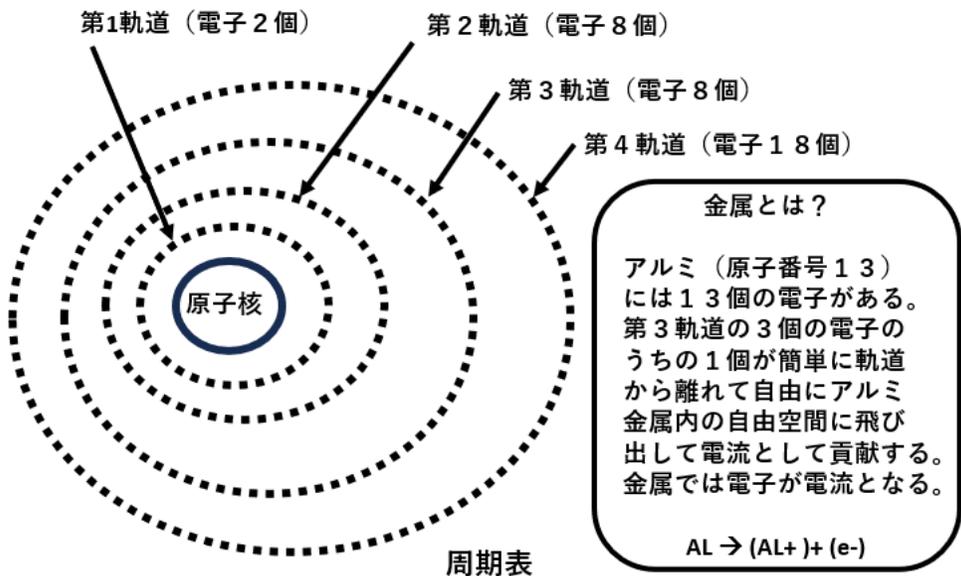
絶縁体とは？

13	14	15	16	17	18
					He ヘリウム 4.003
.....					
B ホウ素 10.81	C 炭素 12.01	N 窒素 14.01	O 酸素 16.00	F フッ素 18.99	Ne ネオン 20.18
Al アルミニウム 26.98	Si ケイ素 28.09	P リン 30.97	S 硫黄 32.07	Cl 塩素 35.45	Ar アルゴン 39.95
Ga ガリウム 69.72	Ge ケイ素 72.63	As ヒ素 74.92	Se セレン 78.96	Br 臭素 79.90	Kr クリプトン 83.80

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18														
1	1 H 水素 1.008	..... 第1軌道 (電子2個)															2 He ヘリウム 4.003														
2	3 Li リチウム 6.941	4 Be ベリリウム 9.012	..... 第2軌道 (電子8個)										5 B ホウ素 10.81	6 C 炭素 12.01	7 N 窒素 14.01	8 O 酸素 16.00	9 F フッ素 18.99	10 Ne ネオン 20.18													
3	11 Na ナトリウム 22.99	12 Mg マグネシウム 24.31	..... 第3軌道 (電子8個)										13 Al アルミニウム 26.98	14 Si ケイ素 28.09	15 P リン 30.97	16 S 硫黄 32.07	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.95													
4	19 K カリウム 39.10	20 Ca カルシウム 40.08	21 Sc スカンジウム 44.96	22 Ti チタン 47.88	23 V バナジウム 50.94	24 Cr クロム 52.00	25 Mn マンガン 54.94	26 Fe 鉄 55.85	27 Co コバルト 58.93	28 Ni ニッケル 58.69	29 Cu 銅 63.55	30 Zn 亜鉛 65.38	31 Ga ガリウム 69.72	32 Ge ケイ素 72.63	33 As ヒ素 74.92	34 Se セレン 78.96	35 Br 臭素 79.90	36 Kr クリプトン 83.80														
5	37 Rb ルビ듐 85.47	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.91	40 Zr ジルコニウム 91.22	41 Nb ニオブ 92.91	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム 98.91	44 Ru ルビジウム 101.1	45 Rh ロジウム 102.9	46 Pd パラジウム 106.4	47 Ag 銀 107.9	48 Cd カドミウム 112.4	49 In インジウム 114.8	50 Sn スズ 118.7	51 Sb アンチモン 121.8	52 Te テルル 127.6	53 I ヨウ素 126.9	54 Xe キセノン 131.3														
6	55 Cs セシウム 132.9	56 Ba バリウム 137.3	57 La ランタン	58 Ce セリウム 140.12	59 Pr プラセチウム 140.91	60 Nd ネオジム 144.24	61 Pm プロメチウム	62 Sm サマリウム 150.36	63 Eu ユークリウム 151.96	64 Gd ガドリウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.93	66 Dy ジロジウム 162.50	67 Ho ホウメチウム 164.93	68 Er エルビウム 167.26	69 Tm テマリウム 168.93	70 Yb ytterbium 173.05	71 Lu ルテチウム 174.96	72 Hf ハフニウム 178.49	73 Ta タンタル 180.95	74 W タングステン 183.85	75 Re レニウム 186.21	76 Os オスマニウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.22	78 Pt 白金 195.08	79 Au 金 196.97	80 Hg 水銀 200.59	81 Tl タリウム 204.38	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマuth 208.98	84 Po ポロニウム 209	85 At アスタチン 210	86 Rn ラドン 222
7	87 Fr フランシウム 223	88 Ra ラジウム 226	89 Ac アクチン	90 Th トリウム 232.04	91 Pa protactinium 231.04	92 U ウラン 238.03	93 Np ネプツニウム 237.05	94 Pu プルトニウム 244.06	95 Am アメリシウム 243.06	96 Cm カリフォルニウム 247	97 Bk バークリウム 247	98 Cf カリフォルニウム 251	99 Es エールビウム 252	100 Fm フェルミウム 257	101 Md メンデルシウム 258	102 No ノボリウム 259	103 Lr ルテチウム 261	104 Rf ラファエリウム 261	105 Db ドブニウム 262	106 Sg シグマニウム 266	107 Bh ブハニウム 264	108 Hs ヘンリクスニウム 264	109 Mt ミッターリウム 268	110 Ds ダズニウム 271	111 Rg レグニウム 272	112 Cn コペルニウム 285	113 Nh ニホニウム 286	114 Fl フルロリウム 289	115 Mc モックリウム 288	116 Lv リフモフニウム 293	117 Ts テネシウム 294	118 Og オガネソン 294

軌道番号

原子の構造

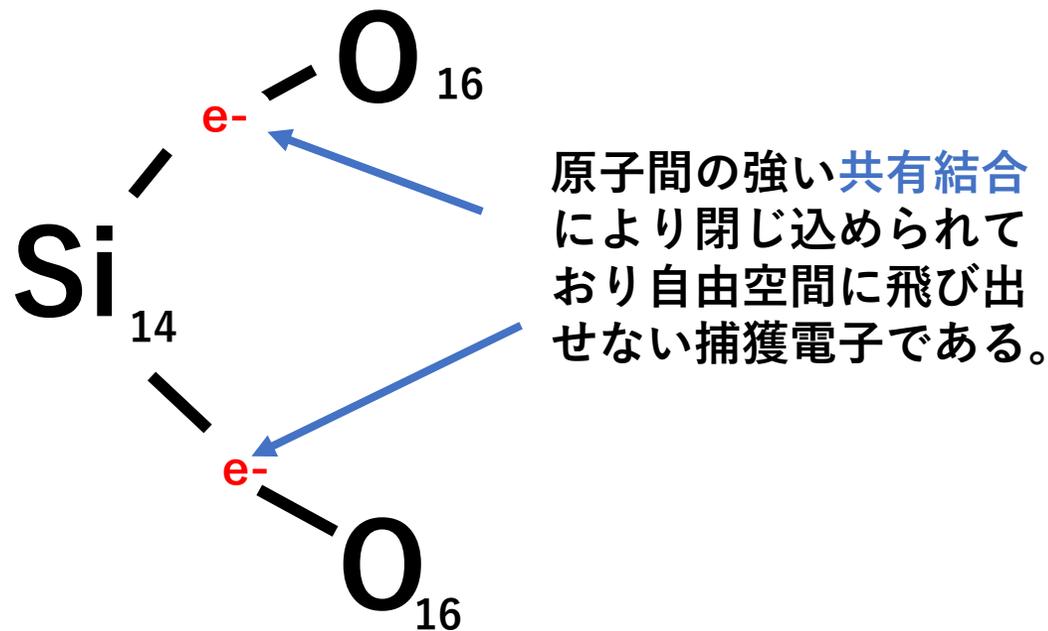


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	¹ H 水素 1.008	..... 第1軌道 (電子2個)																² He ヘリウム 4.003
2	³ Li リチウム 6.941	⁴ Be ベリリウム 9.012	..... 第2軌道 (電子8個)										⁵ B ホウ素 10.81	⁶ C 炭素 12.01	⁷ N 窒素 14.01	⁸ O 酸素 16.00	⁹ F フッ素 18.99	¹⁰ Ne ネオン 20.18
3	¹¹ Na ナトリウム 22.99	¹² Mg マグネシウム 24.31	..... 第3軌道 (電子8個)										¹³ Al アルミニウム 26.98	¹⁴ Si シリコン 28.09	¹⁵ P リン 30.97	¹⁶ S 硫黄 32.07	¹⁷ Cl 塩素 35.45	¹⁸ Ar アルゴン 39.95
4	¹⁹ K カリウム 39.10	²⁰ Ca カルシウム 40.08	²¹ Sc スカンジウム 44.96	²² Ti チタン 47.88	²³ V バナジウム 50.94	²⁴ Cr クロム 52.00	²⁵ Mn マンガン 54.94	²⁶ Fe 鉄 55.85	²⁷ Co コバルト 58.93	²⁸ Ni ニッケル 58.69	²⁹ Cu 銅 63.55	³⁰ Zn 亜鉛 65.38	³¹ Ga ガリウム 69.72	³² Ge ゲルマニウム 72.63	³³ As 砒素 74.92	³⁴ Se セレン 78.97	³⁵ Br 臭素 79.90	³⁶ Kr クリプトン 83.80
5	³⁷ Rb ルビジウム 85.47	³⁸ Sr ストロンチウム 87.62	³⁹ Y イットリウム 88.91	⁴⁰ Zr ジルコニウム 91.22	⁴¹ Nb タンタル 92.91	⁴² Mo モリブデン 95.94	⁴³ Tc テクネチウム 98.91	⁴⁴ Ru ルビジウム 101.1	⁴⁵ Rh ロジウム 102.9	⁴⁶ Pd パラジウム 106.4	⁴⁷ Ag 銀 107.9	⁴⁸ Cd カドミウム 112.4	⁴⁹ In インジウム 114.8	⁵⁰ Sn スズ 118.7	⁵¹ Sb アンチモン 121.8	⁵² Te テルル 127.6	⁵³ I ヨウ素 126.9	⁵⁴ Xe キセノン 131.3
6	⁵⁵ Cs セシウム 132.9	⁵⁶ Ba バリウム 137.3	⁵⁷ La ランタン	⁵⁸ Ce セリウム	⁵⁹ Pr プラセオジム	⁶⁰ Nd ネオジム	⁶¹ Pm プロメチウム	⁶² Sm セミウム	⁶³ Eu ユウロピウム	⁶⁴ Gd ガドリウム	⁶⁵ Tb テルビウム	⁶⁶ Dy ジスプロシウム	⁶⁷ Ho ホウメチウム	⁶⁸ Er エルビウム	⁶⁹ Tm テルミウム	⁷⁰ Yb イットリウム	⁷¹ Lu ルテチウム	⁷² Rn ラドン
7	⁸⁷ Fr フランシウム (223)	⁸⁸ Ra ラジウム (226)	⁸⁹ Ac アクチン	⁹⁰ Th トランシウム	⁹¹ Pa プロトアクチン	⁹² U ウラン	⁹³ Np ネプツニウム	⁹⁴ Pu プルトニウム	⁹⁵ Am アメリシウム	⁹⁶ Cm カリフォルニウム	⁹⁷ Bk ベルカリウム	⁹⁸ Cf カリフォルニウム	⁹⁹ Es エジソン	¹⁰⁰ Fm フェルミウム	¹⁰¹ Md メンデルシウム	¹⁰² No ノボロジウム	¹⁰³ Lr ルネシウム	¹⁰⁴ Og オガネソン

軌道番号

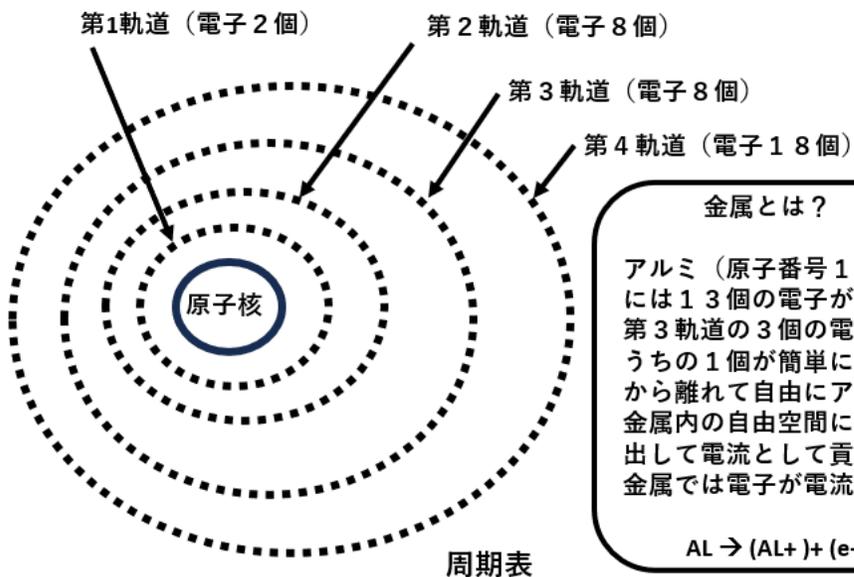
- 絶縁体にはシリコン酸化膜 (SiO₂)もある。原子間の強い共有結合が生じて電子がシリコン酸化膜の分子間引力が強く自由空間に電子が飛び出すことができない。

絶縁体とは？



見かけ上、シリコン原子(14)が酸素(16)と同じく 14+2=16 個の電子を持つ様に見える。

原子の構造



金属とは？

アルミ（原子番号13）には13個の電子がある。第3軌道の3個の電子のうちの1個が簡単に軌道から離れて自由にアルミ金属内の自由空間に飛び出して電流として貢献する。金属では電子が電流となる。

AL → (AL+) + (e-)

●第14族にはシリコン原子（Si）もある。自由電子が非常に少なく電流が流れず、ほぼ電気を通さない高抵抗体である。原子核の引力が強くて軌道電子が簡単に原子から飛び出せない為である。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18														
1	1 H 水素 1.008	..... 第1軌道 (電子2個)																2 He ヘリウム 4.003													
2	3 Li リチウム 6.941	4 Be ベリリウム 9.012	..... 第2軌道 (電子8個)										5 B ホウ素 10.81	6 C 炭素 12.01	7 N 窒素 14.01	8 O 酸素 16.00	9 F フッ素 18.99	10 Ne ネオン 20.18													
3	11 Na ナトリウム 22.99	12 Mg マグネシウム 24.31	..... 第3軌道 (電子8個)										13 Al アルミニウム 26.98	14 Si シリコン 28.09	15 P リン 30.97	16 S 硫黄 32.07	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.95													
4	19 K カリウム 39.10	20 Ca カルシウム 40.08	21 Sc スカンジウム 44.96	22 Ti チタン 47.88	23 V バナジウム 50.94	24 Cr クロム 52.00	25 Mn マンガン 54.94	26 Fe 鉄 55.85	27 Co コバルト 58.93	28 Ni ニッケル 58.69	29 Cu 銅 63.55	30 Zn 亜鉛 65.38	31 Ga ガリウム 69.72	32 Ge ゲルマニウム 72.63	33 As ヒ素 74.92	34 Se セレン 78.97	35 Br 臭素 79.90	36 Kr クリプトン 83.80														
5	37 Rb ルビ듐 85.47	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.91	40 Zr ジルコニウム 91.22	41 Nb ニオブ 92.91	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム 98.91	44 Ru ルビジウム 101.1	45 Rh ロジウム 102.9	46 Pd パラジウム 106.4	47 Ag 銀 107.9	48 Cd カドミウム 112.4	49 In インジウム 114.8	50 Sn スズ 118.7	51 Sb アンチモン 121.8	52 Te テルル 127.6	53 I ヨウ素 126.9	54 Xe キセノン 131.3														
6	55 Cs セシウム 132.9	56 Ba バリウム 137.3	57 La ランタン	58 Ce セリウム 140.12	59 Pr プラセチウム 140.91	60 Nd ネオジム 144.24	61 Pm プロメチウム	62 Sm セミウム 150.36	63 Eu ユウロピウム 151.96	64 Gd ガドリウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.93	66 Dy ジスプロシウム 162.50	67 Ho ホウメシウム 164.93	68 Er エルビウム 167.26	69 Tm テルミウム 168.93	70 Yb イットリウム 173.05	71 Lu ルテチウム 174.97	72 Hf ハフニウム 178.49	73 Ta タンタル 180.95	74 W タングステン 183.84	75 Re レニウム 186.21	76 Os オスマニウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.22	78 Pt 白金 195.08	79 Au 金 196.97	80 Hg 水銀 200.59	81 Tl タリウム 204.38	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマuth 208.98	84 Po ポロニウム 209	85 At アスタチン 210	86 Rn ラドン 222
7	87 Fr フランシウム 223	88 Ra ラジウム 226	89 Ac アクチン	90 Th チロウ 232.04	91 Pa パラドキシム 231.04	92 U ウラン 238.03	93 Np ネプツニウム 237	94 Pu プルトニウム 244	95 Am アメリシウム 243	96 Cm カリフォルニウム 247	97 Bk バークリウム 247	98 Cf カリフォルニウム 251	99 Es エイスンマン 252	100 Fm フェルミウム 257	101 Md メンデルシウム 258	102 No ノボリウム 259	103 Lr ローレンシウム 260	104 Rf ラザフォード	105 Db ドブニウム	106 Sg シグマ	107 Bh ブハウ	108 Hs ヘンリヒ	109 Mt メンテレフ	110 Ds ダズ	111 Rg リグバウム	112 Cn コペルニウム	113 Nh ニホニウム	114 Fl フル	115 Mc モック	116 Lv ルベリウム	117 Ts テソ	118 Og オガネソン

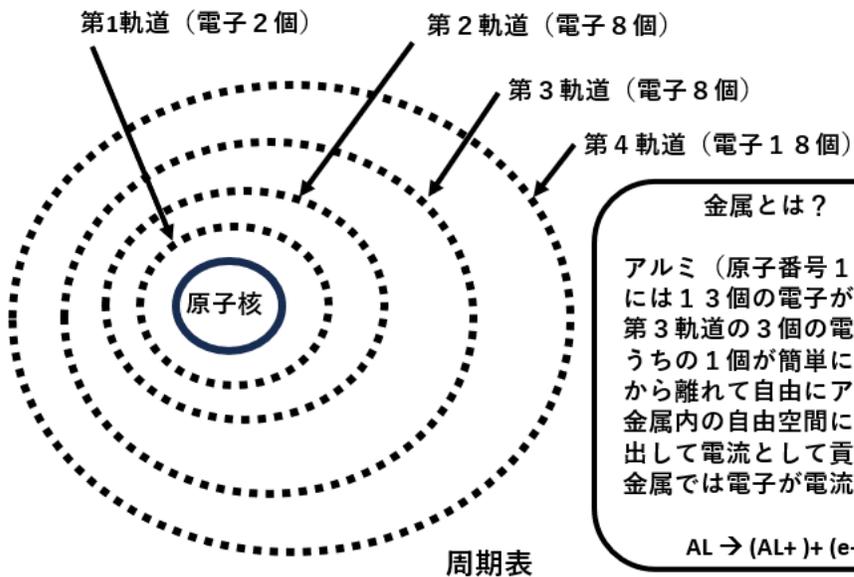
第14族



絶縁体とは？

13	14	15	16	17	18
					2 He ヘリウム 4.003
.....					
5 B ホウ素 10.81	6 C 炭素 12.01	7 N 窒素 14.01	8 O 酸素 16.00	9 F フッ素 18.99	10 Ne ネオン 20.18
13 Al アルミニウム 26.98	14 Si シリコン 28.09	15 P リン 30.97	16 S 硫黄 32.07	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.95
31 Ga ガリウム 69.72	32 Ge ゲルマニウム 72.63	33 As ヒ素 74.92	34 Se セレン 78.97	35 Br 臭素 79.90	36 Kr クリプトン 83.80

原子の構造



●しかし、第15族のリン (P) やヒ素 (As) の一番外の軌道にある電子は原子核からの引力が小さい為に簡単に自由空間に飛び出す事ができる。電子が1個自由空間に飛び出し、もとの原子は、リンイオン (P+) やヒ素のイオン (As+) となり、第14族のまわりのシリコン原子と同族として電氣的に安定な物質になる。

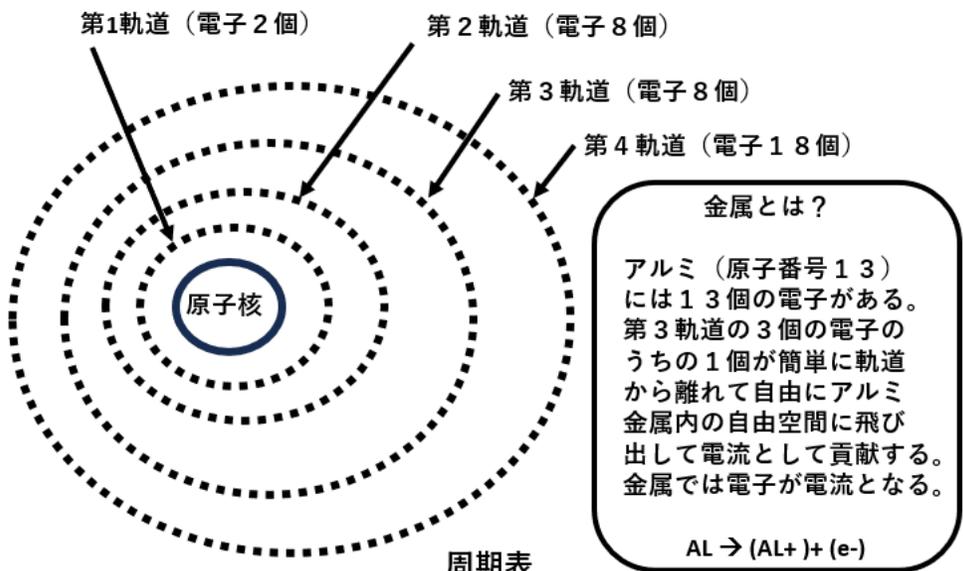


13	14	15	16	17	18
第3軌道の電子の数					He
3個 4個 5個					ヘリウム 4.003
B	C	N	O	F	Ne
10.81	12.01	14.01	16.00	18.99	20.18
Al	Si	P	S	Cl	Ar
26.98	28.09	30.97	32.07	35.45	39.95
Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
69.72	72.63	74.92	78.97	79.90	83.80

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H	第1軌道 (電子2個)																He
2	Li	Be	第2軌道 (電子8個)										B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	第3軌道 (電子8個)										Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

軌道番号

原子の構造



周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18														
1	1 H 水素 1.008	..... 第1軌道 (電子2個)																2 He ヘリウム 4.003													
2	3 Li リチウム 6.941	4 Be ベリリウム 9.012	..... 第2軌道 (電子8個)										5 B ホウ素 10.81	6 C 炭素 12.01	7 N 窒素 14.01	8 O 酸素 16.00	9 F フッ素 18.99	10 Ne ネオン 20.18													
3	11 Na ナトリウム 22.99	12 Mg マグネシウム 24.31	..... 第3軌道 (電子8個)										13 Al アルミニウム 26.98	14 Si ケイ素 28.09	15 P リン 30.97	16 S 硫黄 32.07	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.95													
4	19 K カリウム 39.10	20 Ca カルシウム 40.08	21 Sc スカンジウム 44.96	22 Ti チタン 47.88	23 V バナジウム 50.94	24 Cr クロム 52.00	25 Mn マンガン 54.94	26 Fe 鉄 55.85	27 Co コバルト 58.93	28 Ni ニッケル 58.69	29 Cu 銅 63.55	30 Zn 亜鉛 65.38	31 Ga ガリウム 69.72	32 Ge ゲルマニウム 72.63	33 As ヒ素 74.92	34 Se セレン 78.97	35 Br 臭素 79.90	36 Kr クリプトン 83.80														
5	37 Rb ルビ듐 85.47	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.91	40 Zr ジルコニウム 91.22	41 Nb タンタル 92.91	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム 98.91	44 Ru ルビジウム 101.1	45 Rh ロジウム 102.9	46 Pd パラジウム 106.4	47 Ag 銀 107.9	48 Cd カドミウム 112.4	49 In インジウム 114.8	50 Sn スズ 118.7	51 Sb アンチモン 121.8	52 Te テルル 127.6	53 I ヨウ素 126.9	54 Xe キセノン 131.3														
6	55 Cs セシウム 132.9	56 Ba バリウム 137.3	57 La ランタン	58 Ce セリウム 140.12	59 Pr プラセオジム 140.91	60 Nd ネオジム 144.24	61 Pm プロメチウム	62 Sm サマリウム 150.36	63 Eu ユウロピウム 151.96	64 Gd ガドリウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.93	66 Dy ジスプロシウム 162.50	67 Ho ホウメイトリウム 164.93	68 Er エルビウム 167.26	69 Tm テルミウム 168.93	70 Yb イットリウム 173.05	71 Lu ルテチウム 174.97	72 Hf ハフニウム 178.49	73 Ta タンタル 180.95	74 W タングステン 183.84	75 Re レニウム 186.21	76 Os オスマニウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.22	78 Pt 白金 195.08	79 Au 金 196.97	80 Hg 水銀 200.59	81 Tl タリウム 204.38	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマuth 208.98	84 Po ポロニウム	85 At アスタチン	86 Rn ラドン
7	87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	89 Ac アクチン	90 Th トランシウム	91 Pa プロトアクチン	92 U ウラン	93 Np ネプツウム	94 Pu プルトニウム	95 Am アメリシウム	96 Cm カリフォルニウム	97 Bk バークリウム	98 Cf カリフォルニウム	99 Es エールビウム	100 Fm フェルミウム	101 Md メンデルシウム	102 No ノボリウム	103 Lr ローレンシウム	104 Rf ラザフォード	105 Db ドブニウム	106 Sg シグマ	107 Bh ブハリウム	108 Hs ヘンリクス	109 Mt メンテレーフ	110 Ds ダズ	111 Rg リグバウム	112 Cn コペルニウム	113 Nh ニホニウム	114 Fl フルロウ	115 Mc モック	116 Lv リフ	117 Ts テソ	118 Og オガネソン

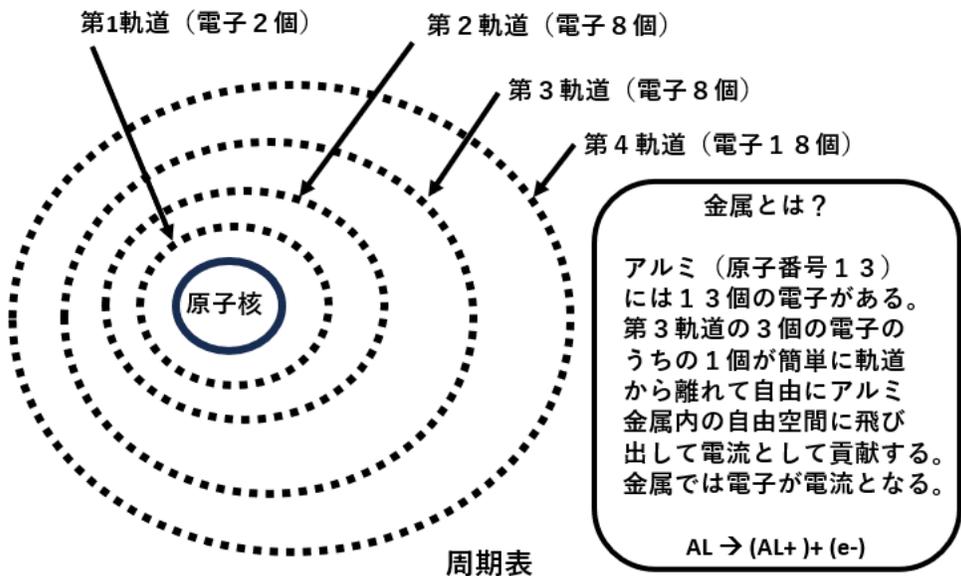
軌道番号

●第13族のボロン (B)は逆にシリコン原子から軌道電子を1個を奪い取り、マイナスに荷電したボロンイオン (B-) となる。一方、電子を奪われたシリコン原子はプラスに荷電したシリコンイオン (Si+) となる。その周りには中性のシリコン原子があり簡単に隣接するシリコン原子から電子を1個奪い中性に戻る。一方の電子を盗まれたシリコン原子が今度はプラスに荷電したシリコンイオン (Si+) となる。シリコンイオン (Si+) をホールと呼ぶ。



13	14	15	16	17	18
第3軌道の電子の数					2
.....					He
3個 4個 5個					He ヘリウム 4.003
5 B ホウ素 10.81	6 C 炭素 12.01	7 N 窒素 14.01	8 O 酸素 16.00	9 F フッ素 18.99	10 Ne ネオン 20.18
13 Al アルミニウム 26.98	14 Si ケイ素 28.09	15 P リン 30.97	16 S 硫黄 32.07	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.95
31 Ga ガリウム 69.72	32 Ge ゲルマニウム 72.63	33 As ヒ素 74.92	34 Se セレン 78.97	35 Br 臭素 79.90	36 Kr クリプトン 83.80

原子の構造



●第14族の炭素原子 (C)の結晶体のダイヤモンドは透明で光を通すことができる。原子核の引力が強くて軌道電子が簡単に原子から飛び出せない。ダイヤモンドの中は自由電子が不在で電流が流れない。電気を通さないので、絶縁体と呼ばれる。

●絶縁体にはシリコン酸化膜 (SiO₂)もある。原子間の強い共有結合が生じて電子がシリコン酸化膜の分子間引力が強くて自由空間に電子が飛び出すことができない。

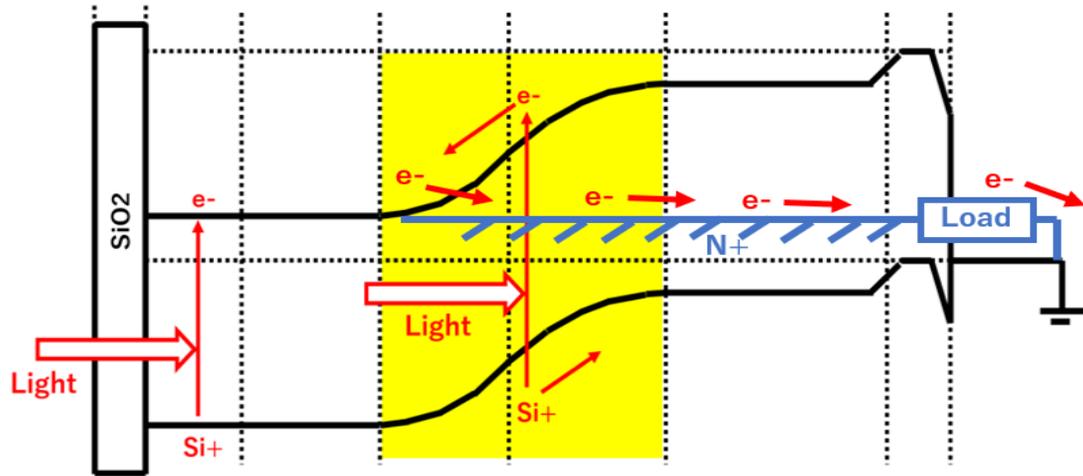
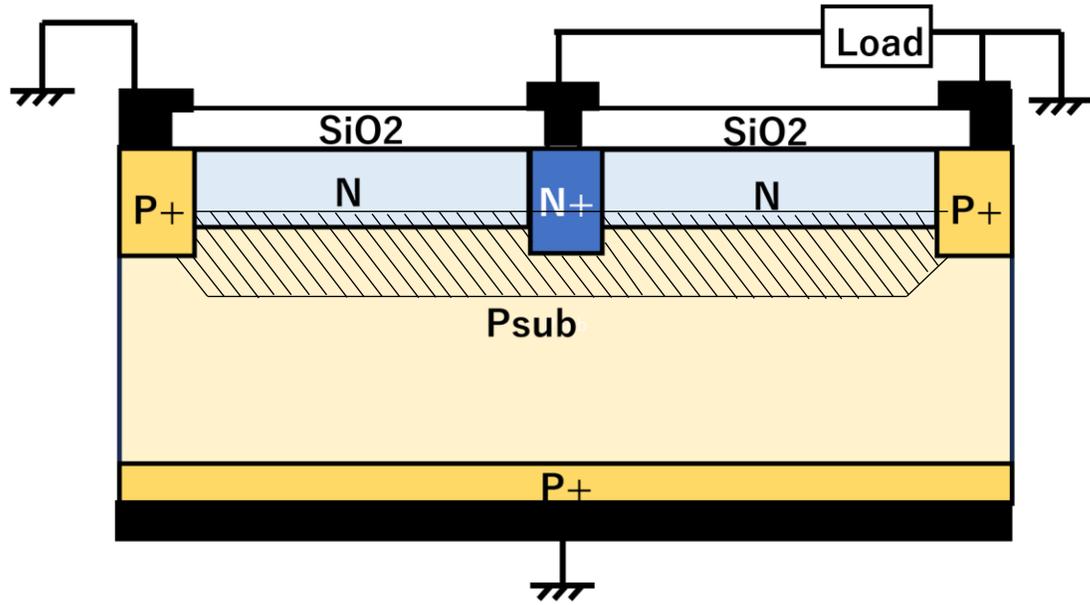
●第14族にはシリコン原子 (Si)もある。自由電子が非常に少なく電流が流れず、ほぼ電気を通さない高抵抗体である。原子核の引力が強くて軌道電子が簡単に原子から飛び出せない為である。

●しかし、第15族のリン (P)やヒ素 (As)の一番外の軌道にある電子は原子核からの引力が小さい為に簡単に自由空間に飛び出す事ができる。電子が1個自由空間に飛び出し、もとの原子は、リンイオン (P+) やヒ素のイオン (As+) となり、第14族のまわりのシリコン原子と同族として電氣的に安定な物質になる。

●第13族のボロン (B)や逆にシリコン原子から軌道電子を1個を奪い取り、マイナスに荷電したボロンイオン (B-) となる。一方、電子を奪われたシリコン原子はプラスに荷電したシリコンイオン (Si+) となる。その周りには中性のシリコン原子があり簡単に隣接するシリコン原子から電子を1個奪い中性に戻る。一方の電子を盗まれたシリコン原子が今度はプラスに荷電したシリコンイオン (Si+) となる。シリコンイオン (Si+) をホールと呼ぶ。

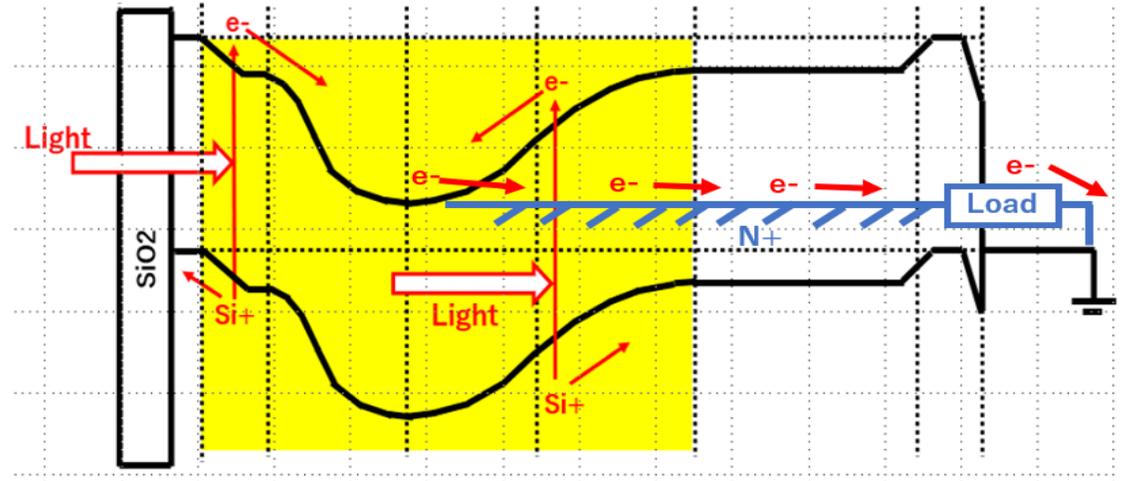
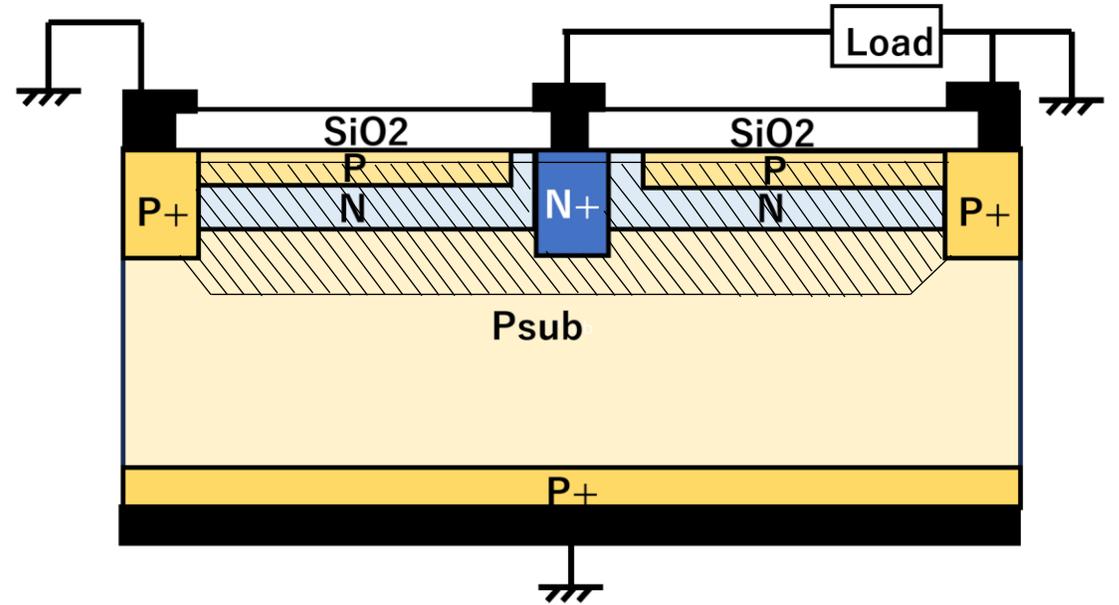
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																	
1	¹ H 水素 1.008	..... 第1軌道 (電子2個)										² He ヘリウム 4.002																																						
2	³ Li リチウム 6.941	⁴ Be ベリリウム 9.012	..... 第2軌道 (電子8個)										⁵ B ホウ素 10.81	⁶ C 炭素 12.01	⁷ N 窒素 14.01	⁸ O 酸素 16.00	⁹ F フッ素 18.99	¹⁰ Ne ネオン 20.18																																
3	¹¹ Na ナトリウム 22.99	¹² Mg マグネシウム 24.31	..... 第3軌道 (電子8個)										¹³ Al アルミニウム 26.98	¹⁴ Si シリコン 28.09	¹⁵ P リン 30.97	¹⁶ S 硫黄 32.07	¹⁷ Cl 塩素 35.45	¹⁸ Ar アルゴン 39.95																																
4	¹⁹ K カリウム 39.10	²⁰ Ca カルシウム 40.08	²¹ Sc スカンジウム 44.96	²² Ti チタン 47.88	²³ V バナジウム 50.94	²⁴ Cr クロム 52.00	²⁵ Mn マンガン 54.94	²⁶ Fe 鉄 55.85	²⁷ Co コバルト 58.93	²⁸ Ni ニッケル 58.69	²⁹ Cu 銅 63.55	³⁰ Zn 亜鉛 65.38	³¹ Ga ガリウム 69.72	³² Ge ゲルマニウム 72.63	³³ As ヒ素 74.92	³⁴ Se セレン 78.97	³⁵ Br 臭素 79.90	³⁶ Kr クリプトン 83.80																																	
5	³⁷ Rb ルビ듐 85.47	³⁸ Sr ストロンチウム 87.62	³⁹ Y イットリウム 88.91	⁴⁰ Zr ジルコニウム 91.22	⁴¹ Nb ニオブ 92.91	⁴² Mo モリブデン 95.94	⁴³ Tc テクネチウム 98.91	⁴⁴ Ru ルテチウム 101.1	⁴⁵ Rh ロジウム 102.9	⁴⁶ Pd パラジウム 106.4	⁴⁷ Ag 銀 107.9	⁴⁸ Cd カドミウム 112.4	⁴⁹ In インジウム 114.8	⁵⁰ Sn スズ 118.7	⁵¹ Sb アンチモン 121.8	⁵² Te テルル 127.6	⁵³ I ヨウ素 126.9	⁵⁴ Xe キセノン 131.3																																	
6	⁵⁵ Cs セシウム 132.9	⁵⁶ Ba バリウム 137.3	⁵⁷ La ランタン	⁵⁸ Ce セリウム	⁵⁹ Pr プラセオジム	⁶⁰ Nd ネオジム	⁶¹ Pm プロメチウム	⁶² Sm スamarium	⁶³ Eu ユウロピウム	⁶⁴ Gd ガドリウム	⁶⁵ Tb テルビウム	⁶⁶ Dy ジスプロシウム	⁶⁷ Ho ホウメチウム	⁶⁸ Er エルビウム	⁶⁹ Tm テルミウム	⁷⁰ Yb イットリウム	⁷¹ Lu ルテチウム	⁷² Hf ハフニウム	⁷³ Ta タンタル	⁷⁴ W タングステン	⁷⁵ Re レニウム	⁷⁶ Os オスミウム	⁷⁷ Ir イリジウム	⁷⁸ Pt 白金	⁷⁹ Au 金	⁸⁰ Hg 水銀	⁸¹ Tl タリウム	⁸² Pb 鉛	⁸³ Bi ビスマuth	⁸⁴ Po ポロニウム	⁸⁵ At アスタチン	⁸⁶ Rn ラドン																			
7	⁸⁷ Fr フランシウム	⁸⁸ Ra ラジウム	⁸⁹ Ac アクチン	⁹⁰ Th トリアム	⁹¹ Pa プロタクトニウム	⁹² U ウラン	⁹³ Np ネプチウム	⁹⁴ Pu プルトニウム	⁹⁵ Am アメリシウム	⁹⁶ Cm カリフォルニウム	⁹⁷ Bk ベルカリウム	⁹⁸ Cf カリフォルニウム	⁹⁹ Es エーシウム	¹⁰⁰ Fm フェルミウム	¹⁰¹ Md メンデレーフ	¹⁰² No ノボロフ	¹⁰³ Lr ルースベリウム	¹⁰⁴ Rg ラザフォード	¹⁰⁵ Hs ヘンリヒ	¹⁰⁶ Ds ドブニウム	¹⁰⁷ Bh ブハリウム	¹⁰⁸ Hs ヘンリヒ	¹⁰⁹ Mt ミテネフ	¹¹⁰ Ds ドブニウム	¹¹¹ Rg ラザフォード	¹¹² Cn コペルニシウム	¹¹³ Nh ニホニウム	¹¹⁴ Fl フルロウ	¹¹⁵ Mc モスコウィウム	¹¹⁶ Lv リバモウ	¹¹⁷ Ts テネシウム	¹¹⁸ Og オガネソン																			
			軌道番号	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118

Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell



Quantum Efficiency $\sim (X_n + X_p)$

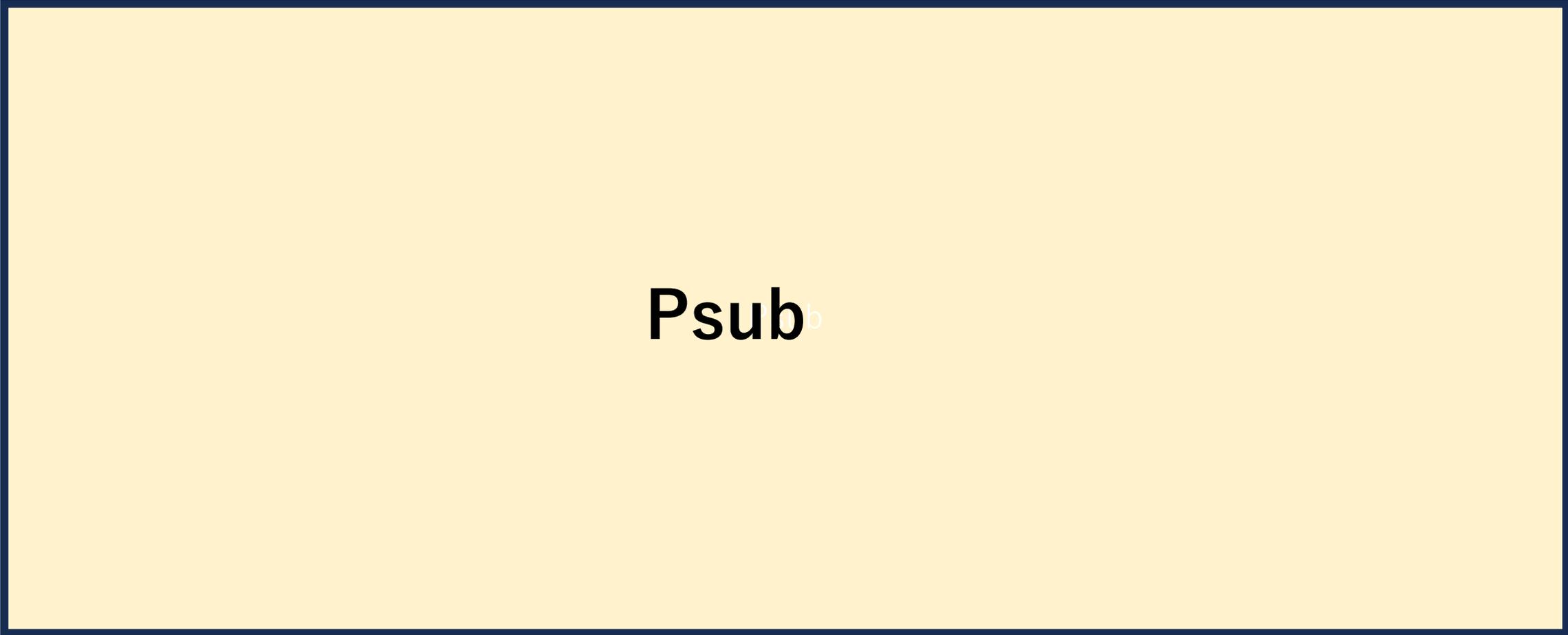
PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell



Quantum Efficiency $\sim (X_s + 2X_n + X_p)$

Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell

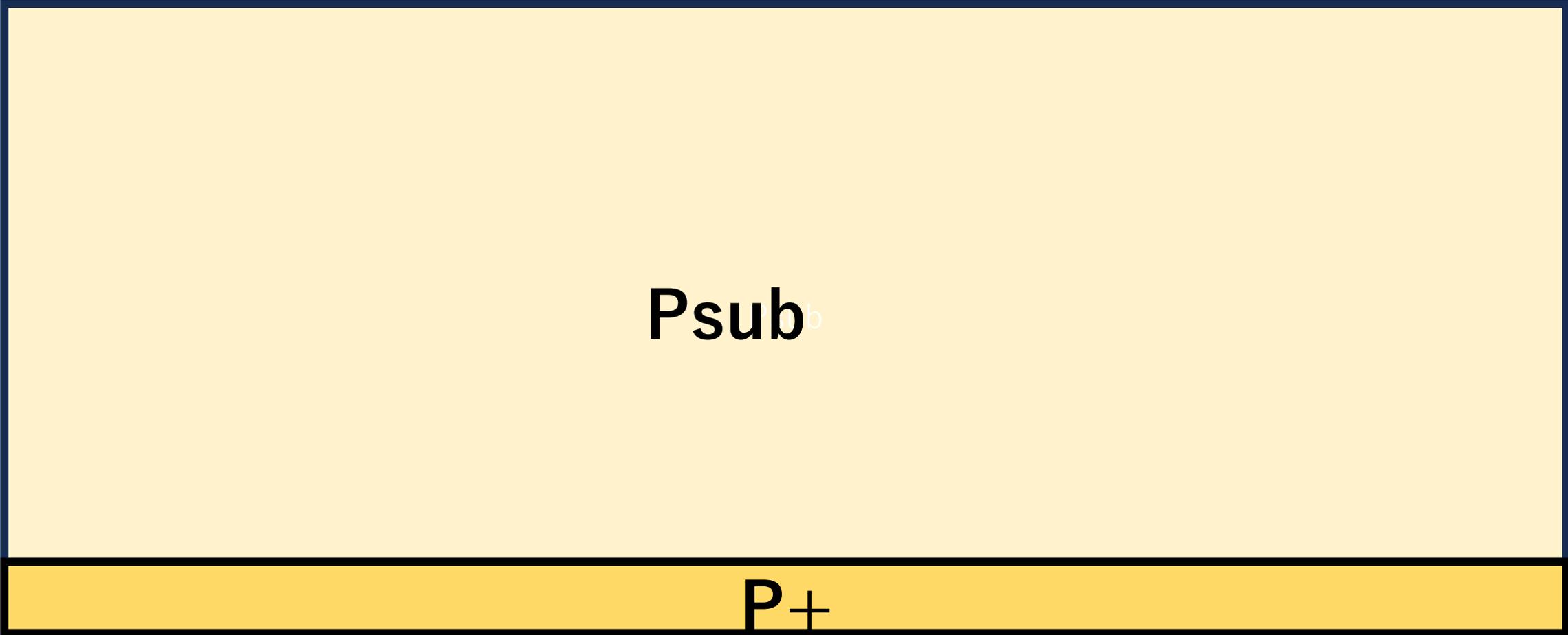
STEP_001



Psub

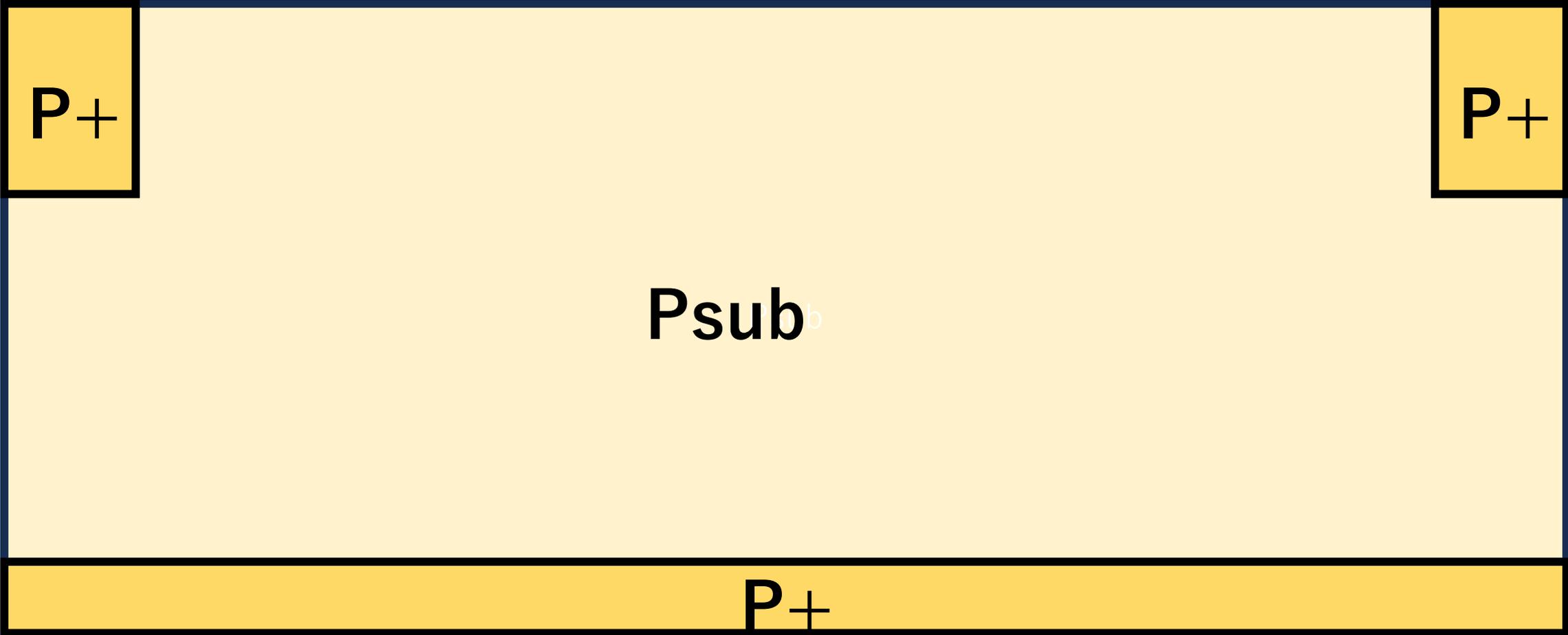
Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell

STEP_002

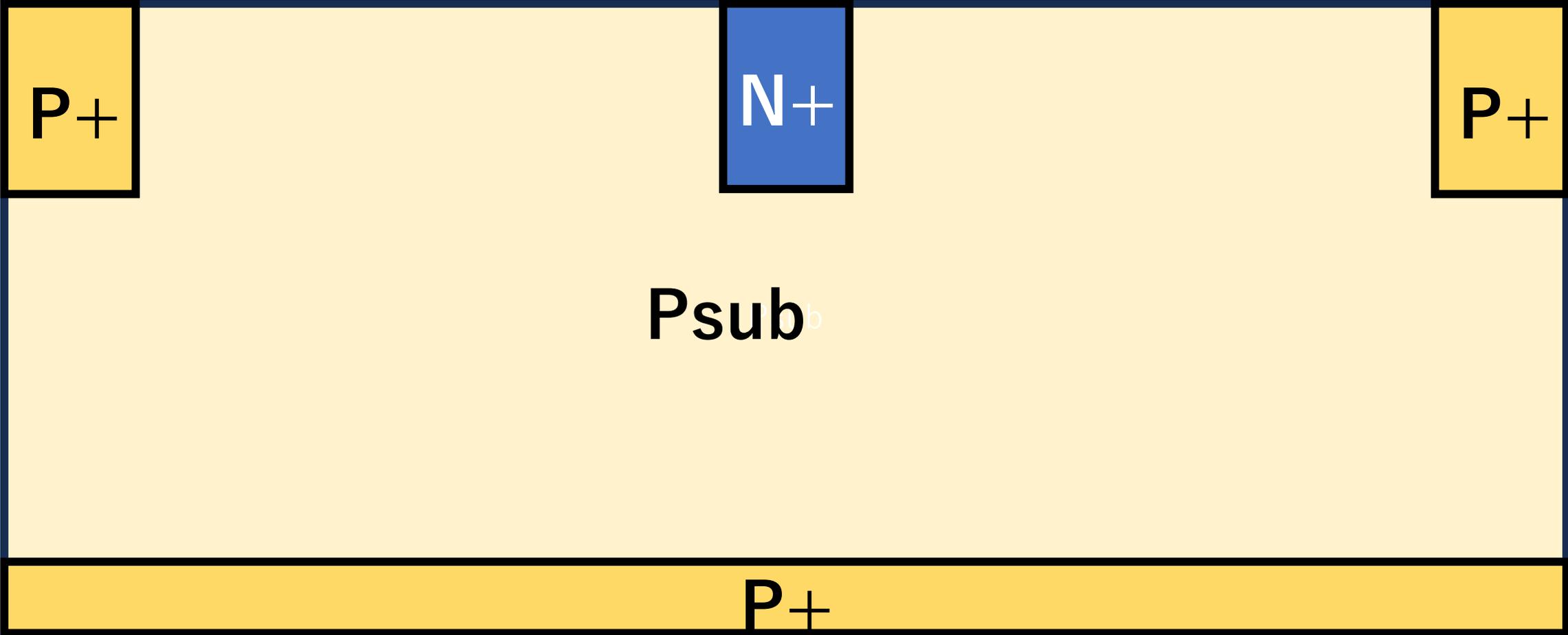


Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell

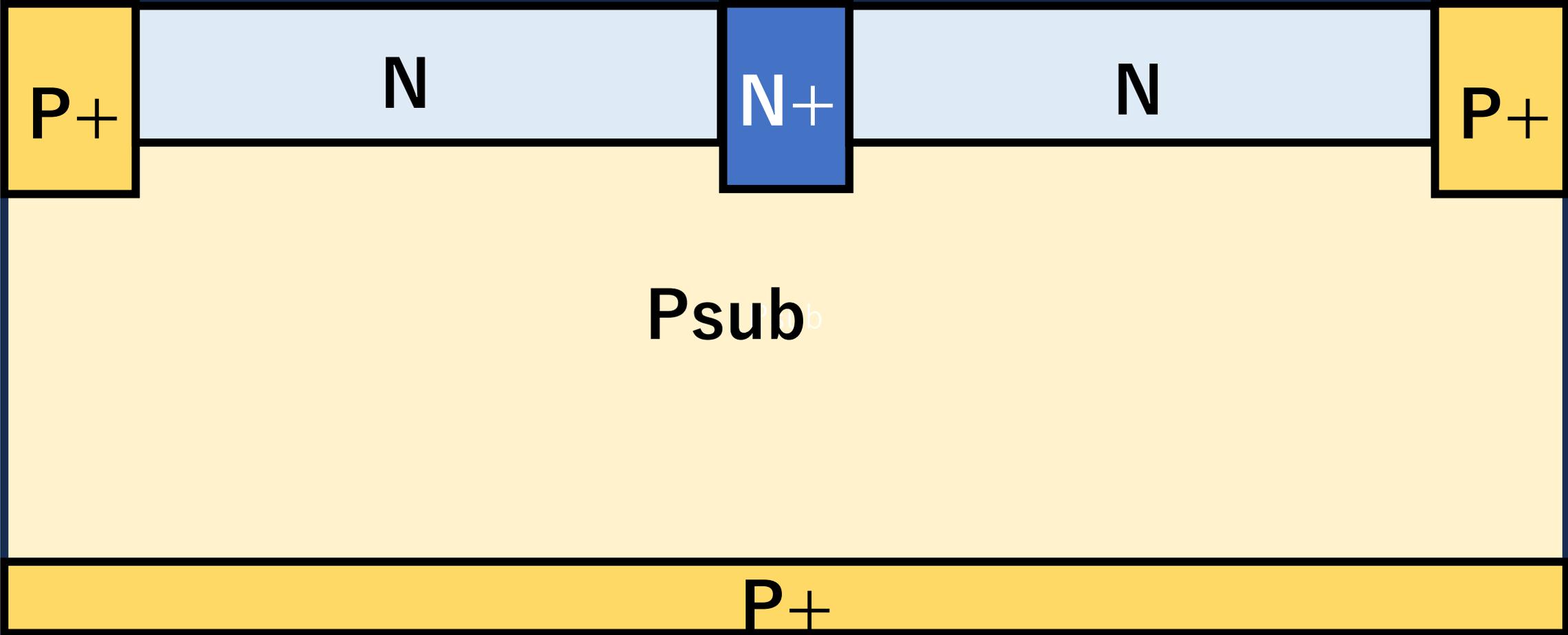
STEP_003



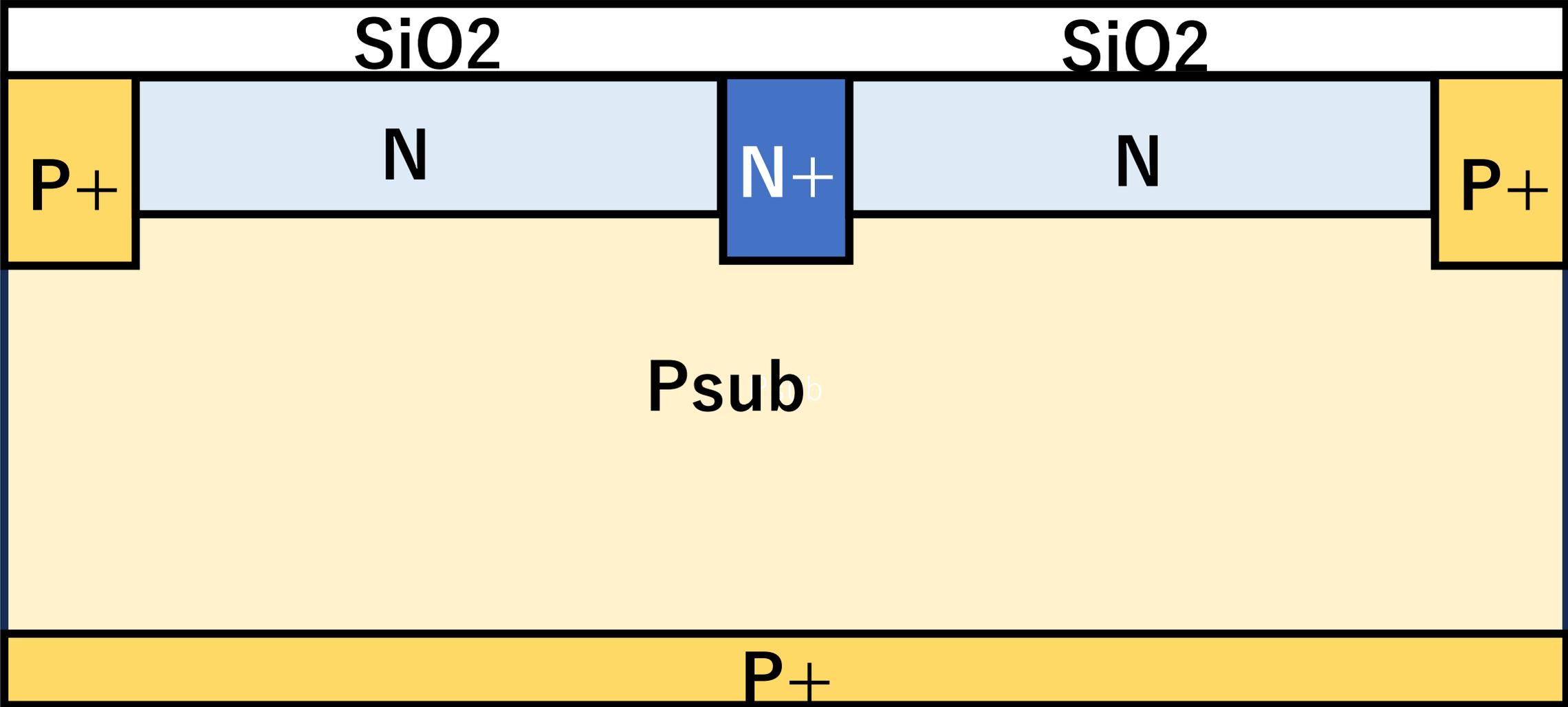
Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell STEP_004



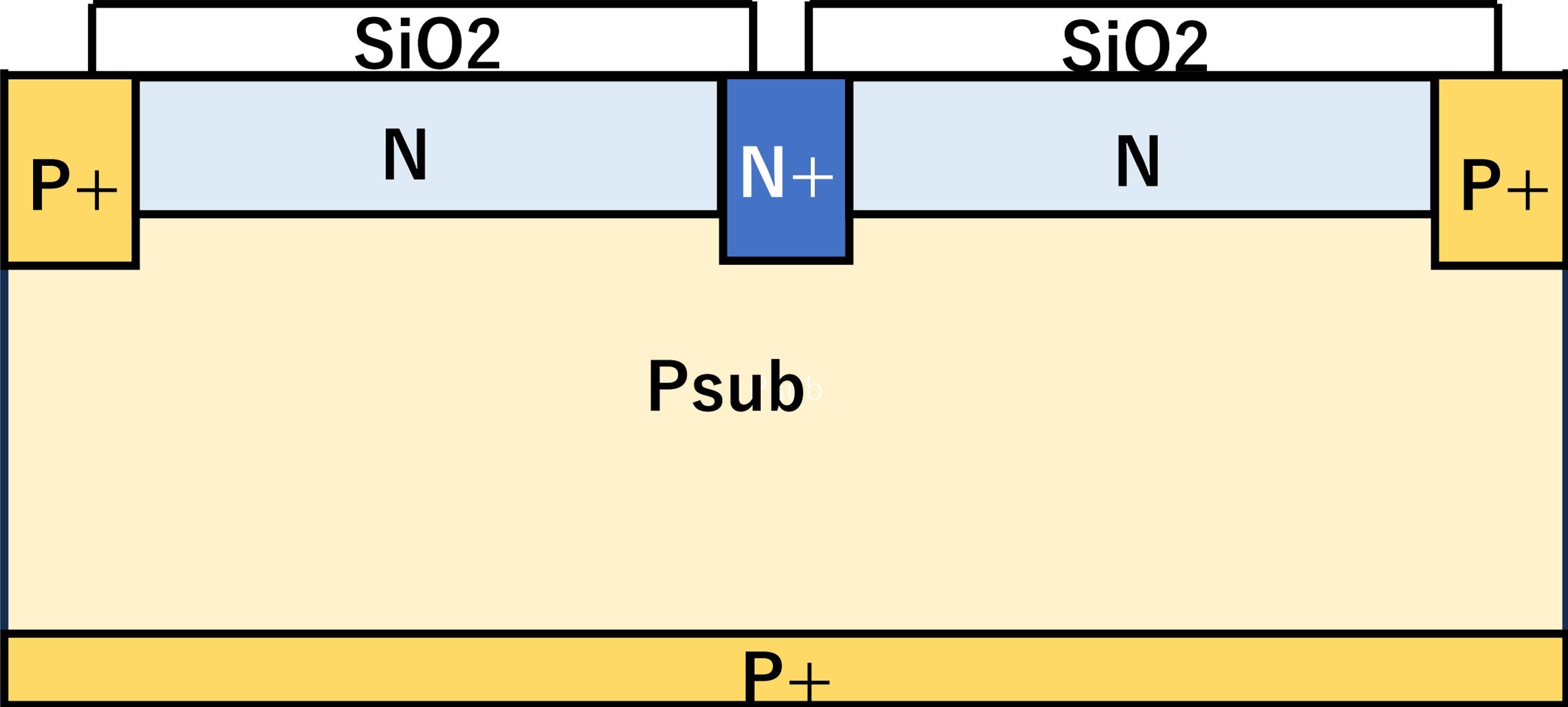
Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell STEP_005



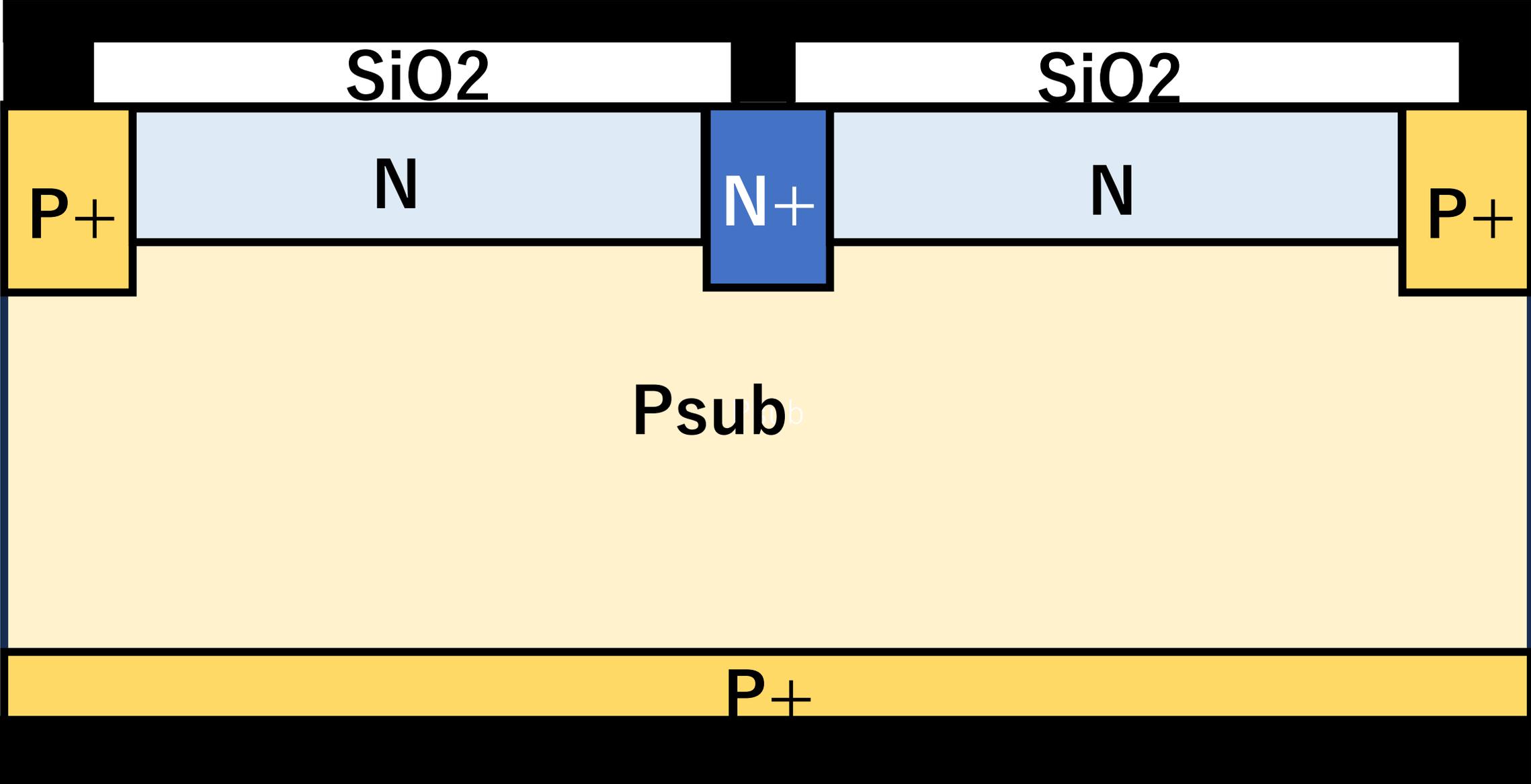
Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell STEP_006



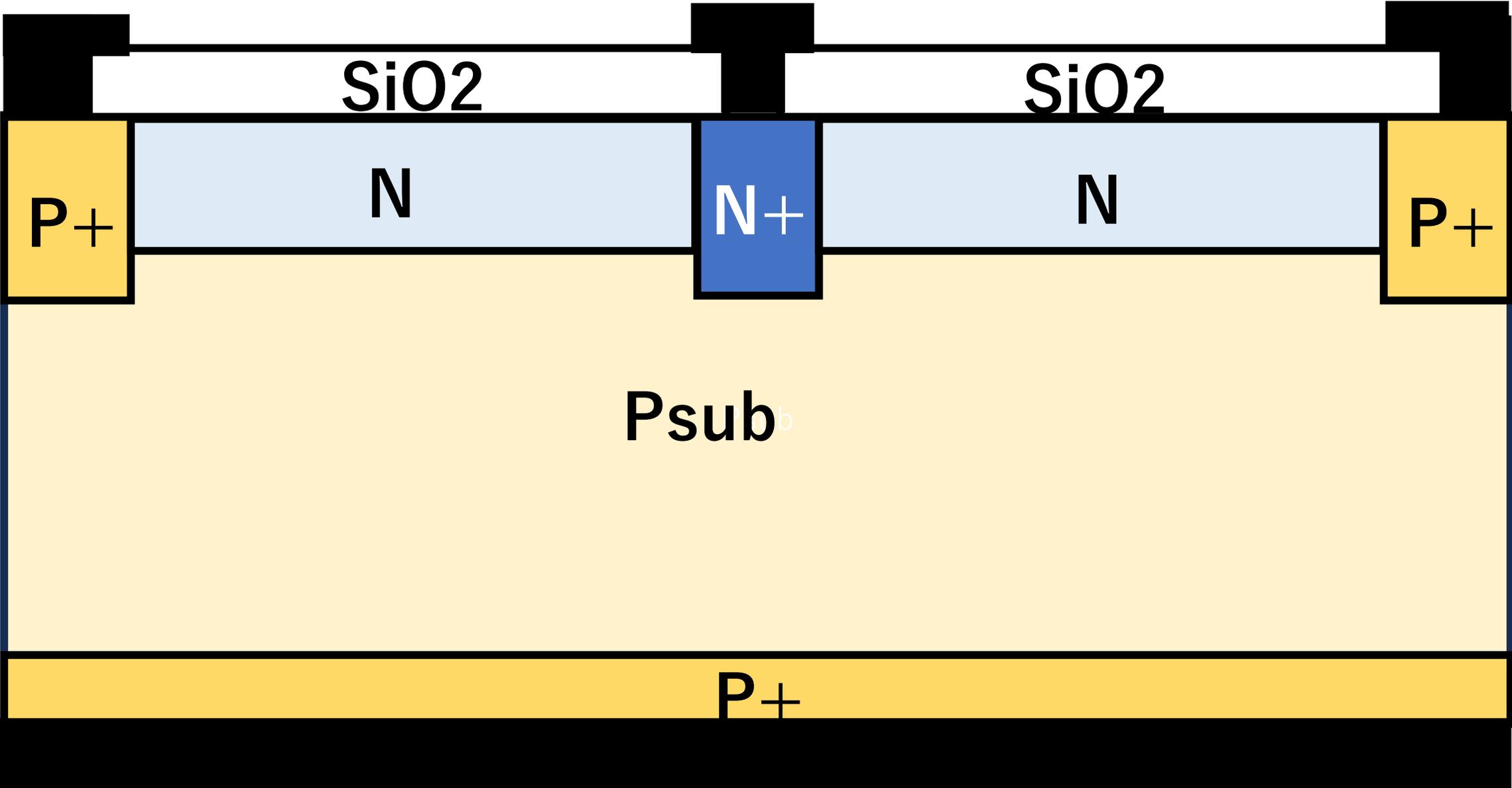
Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell STEP_007

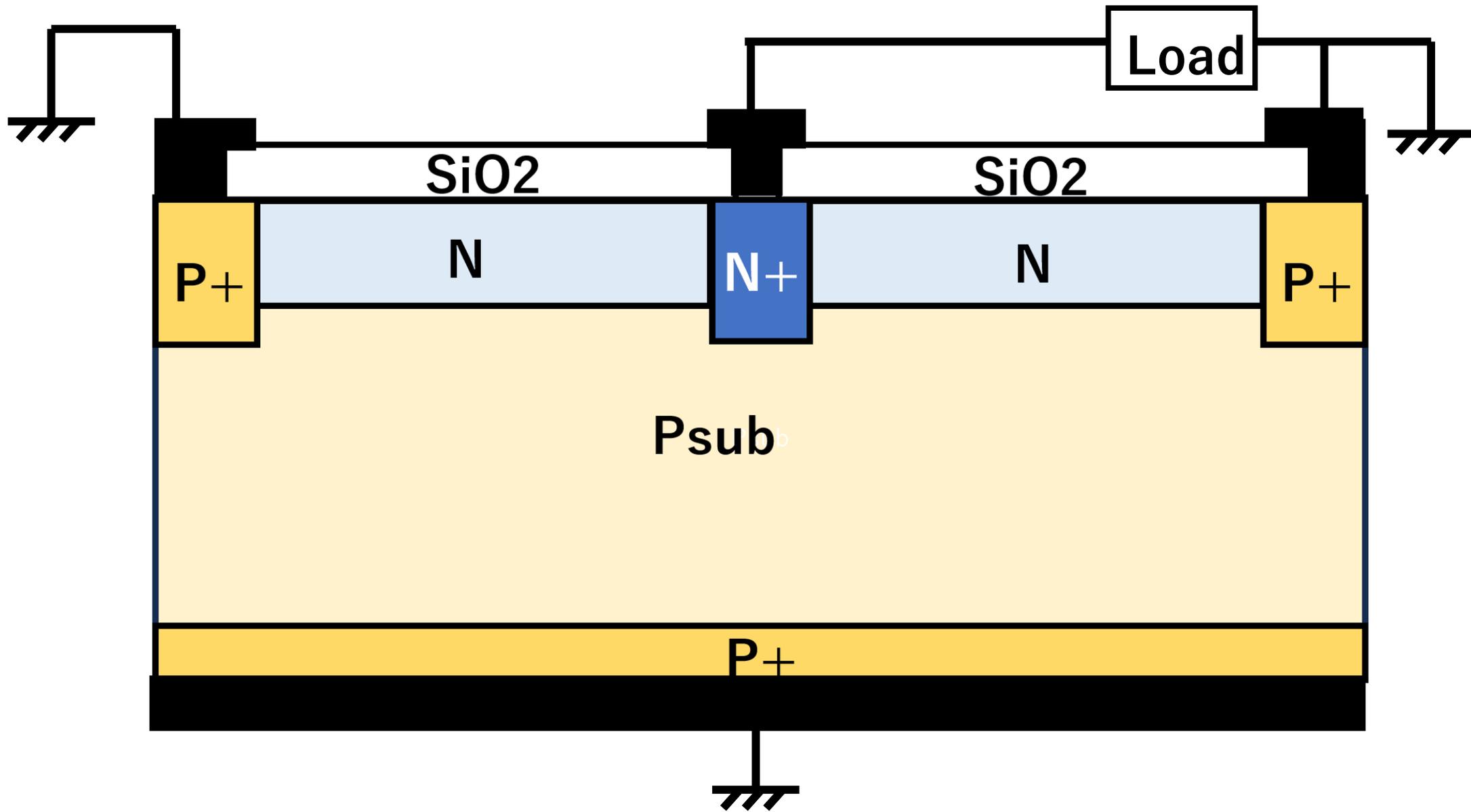


Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell STEP_008

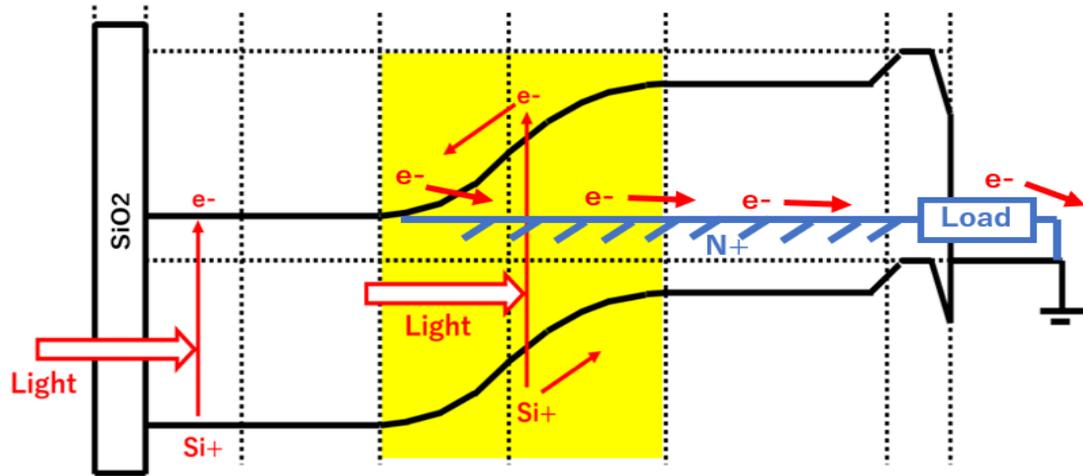
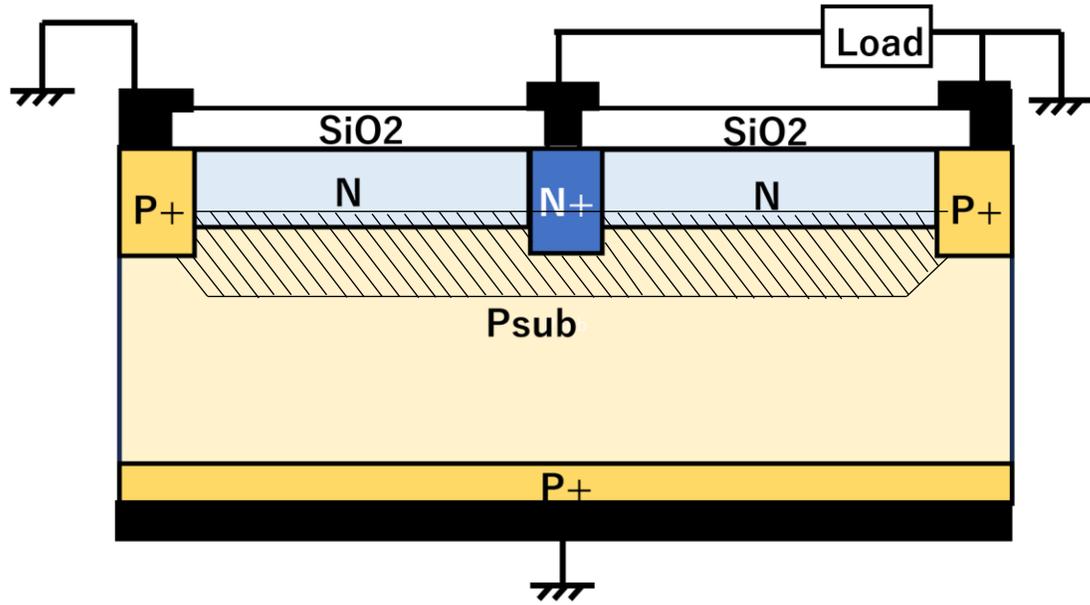


Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell STEP_009



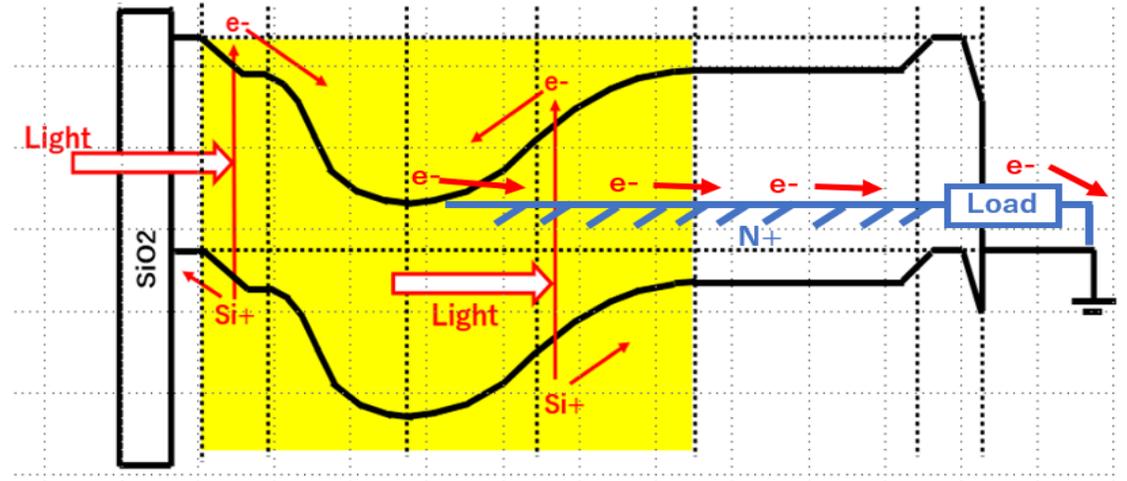
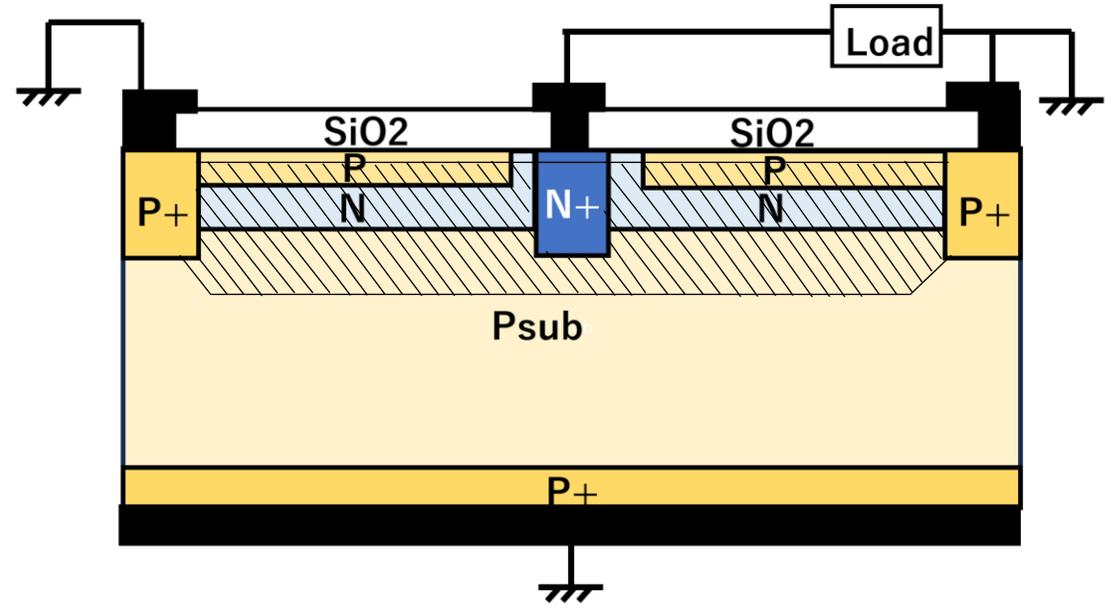


Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell



Quantum Efficiency $\sim (X_n + X_p)$

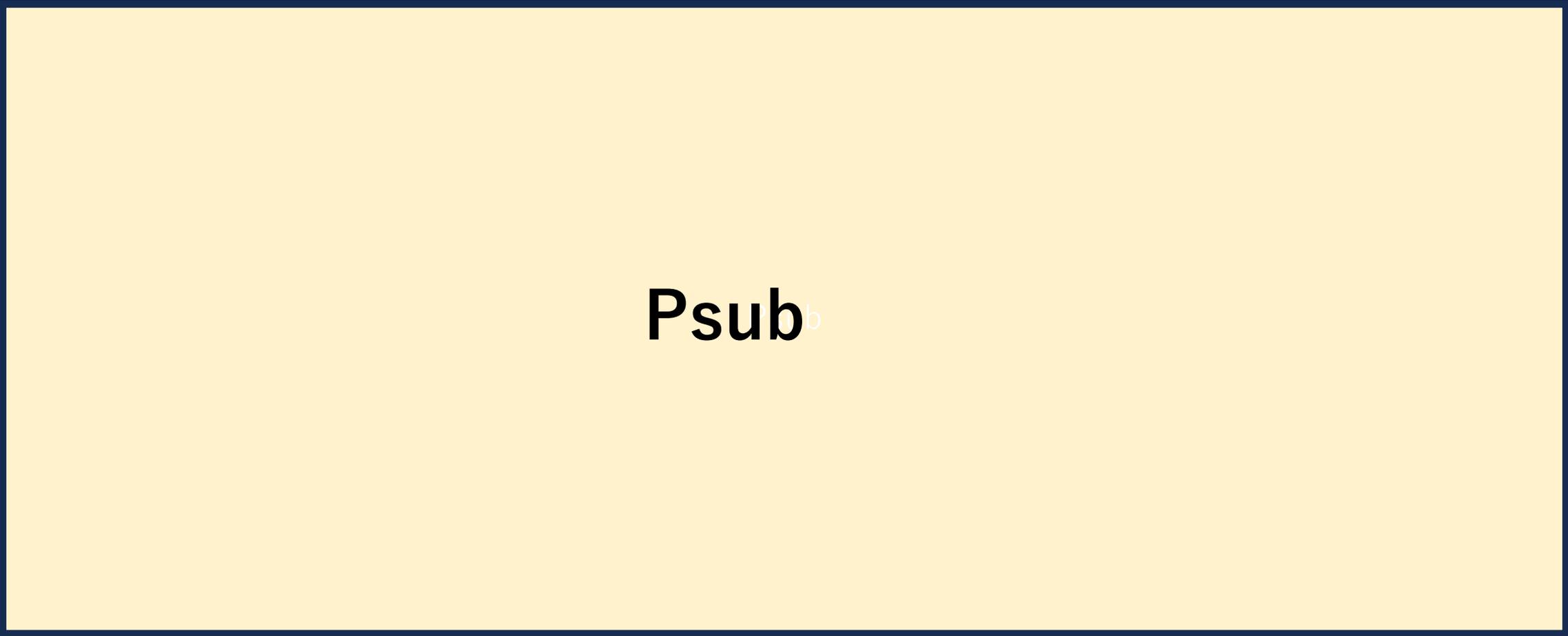
PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell



Quantum Efficiency $\sim (X_s + 2X_n + X_p)$

PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

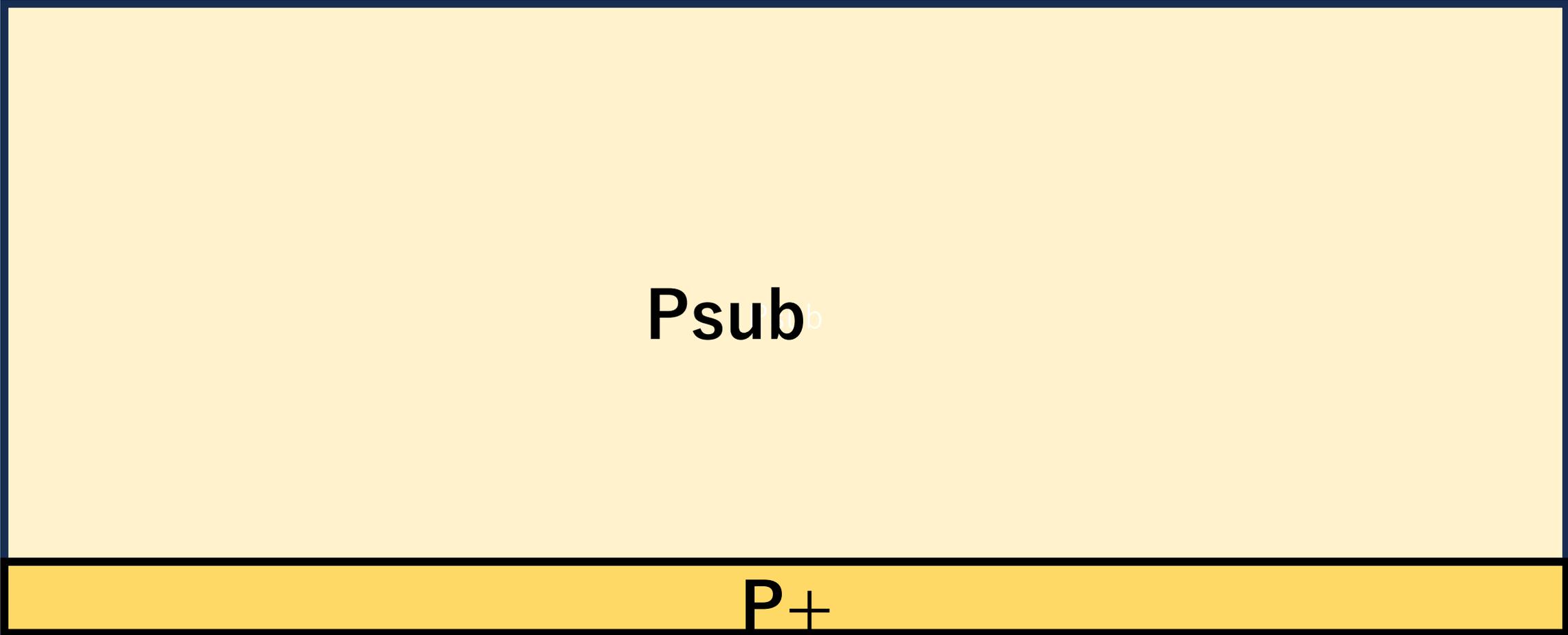
STEP_001



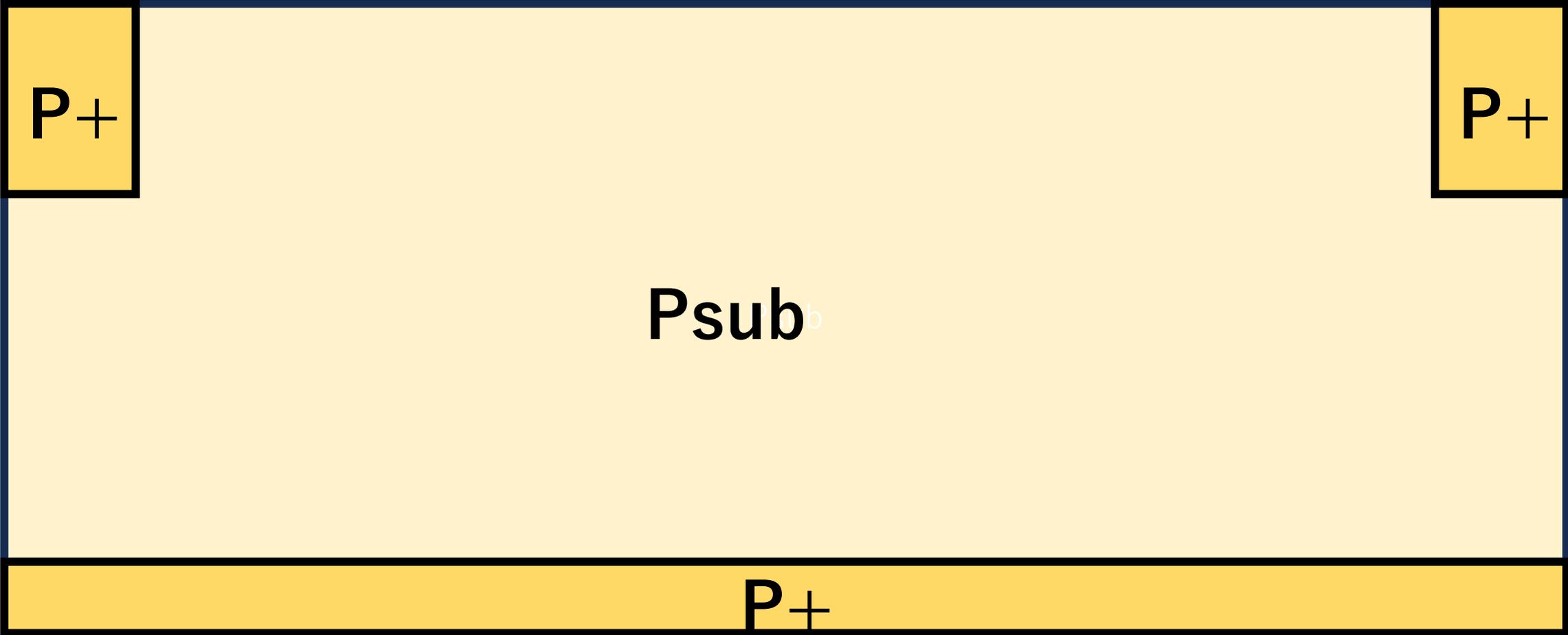
Psub^b

PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

STEP_002

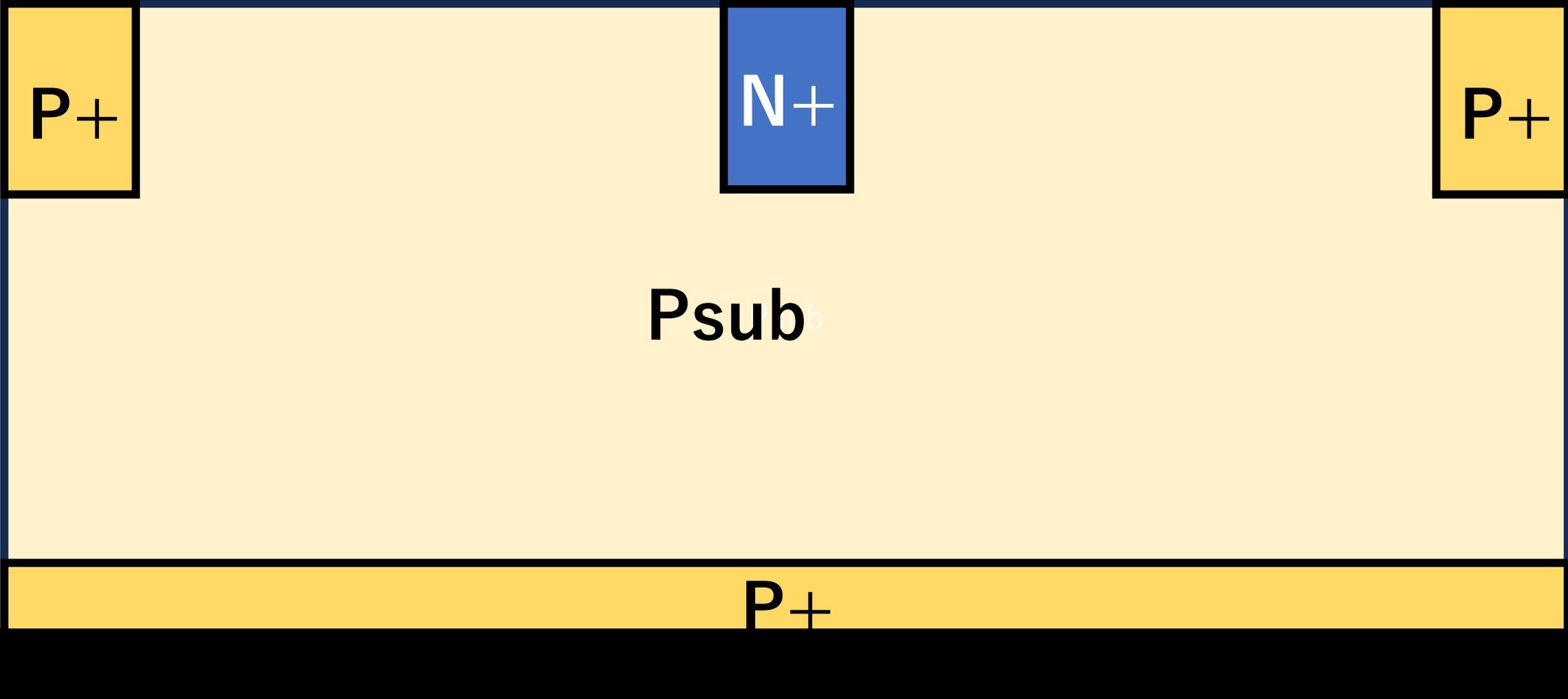


PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

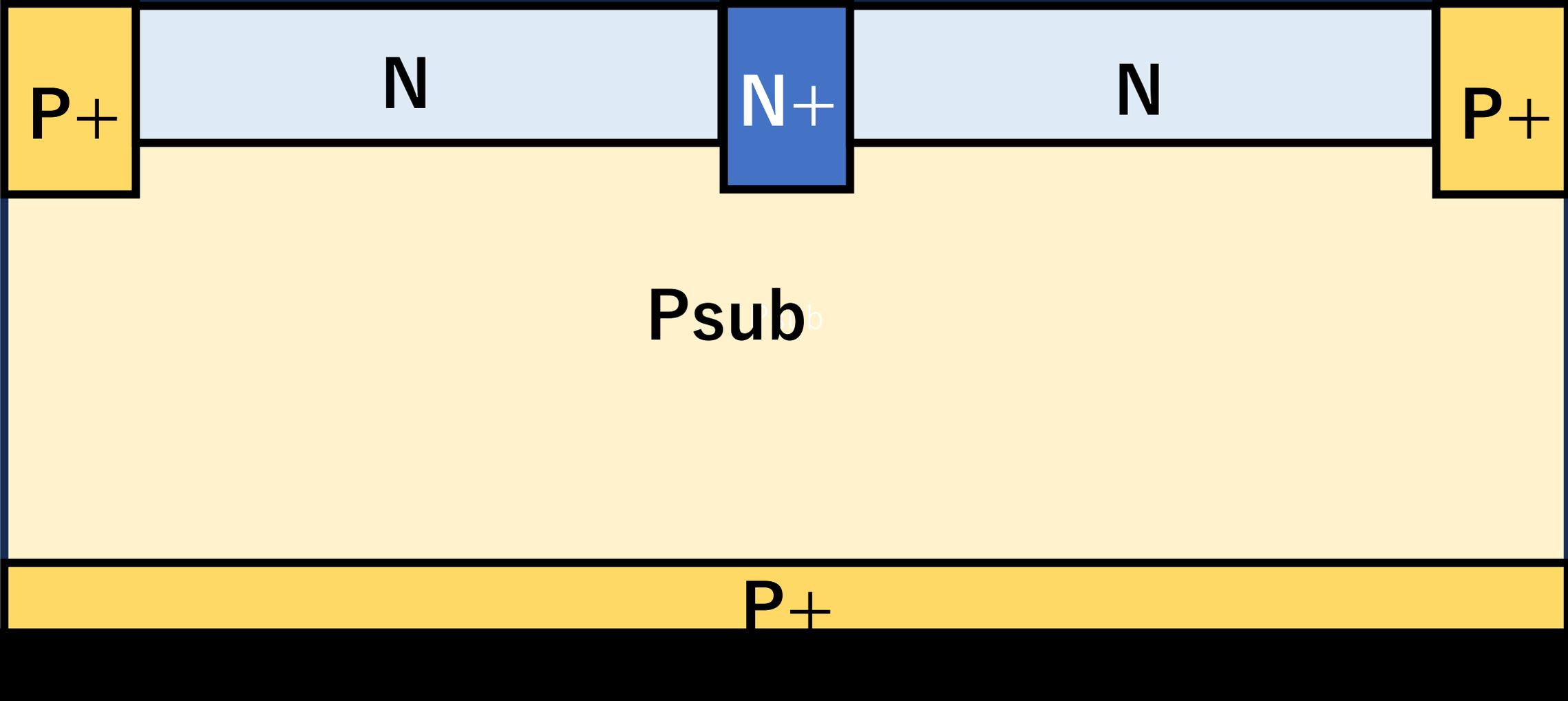


PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

STEP_004

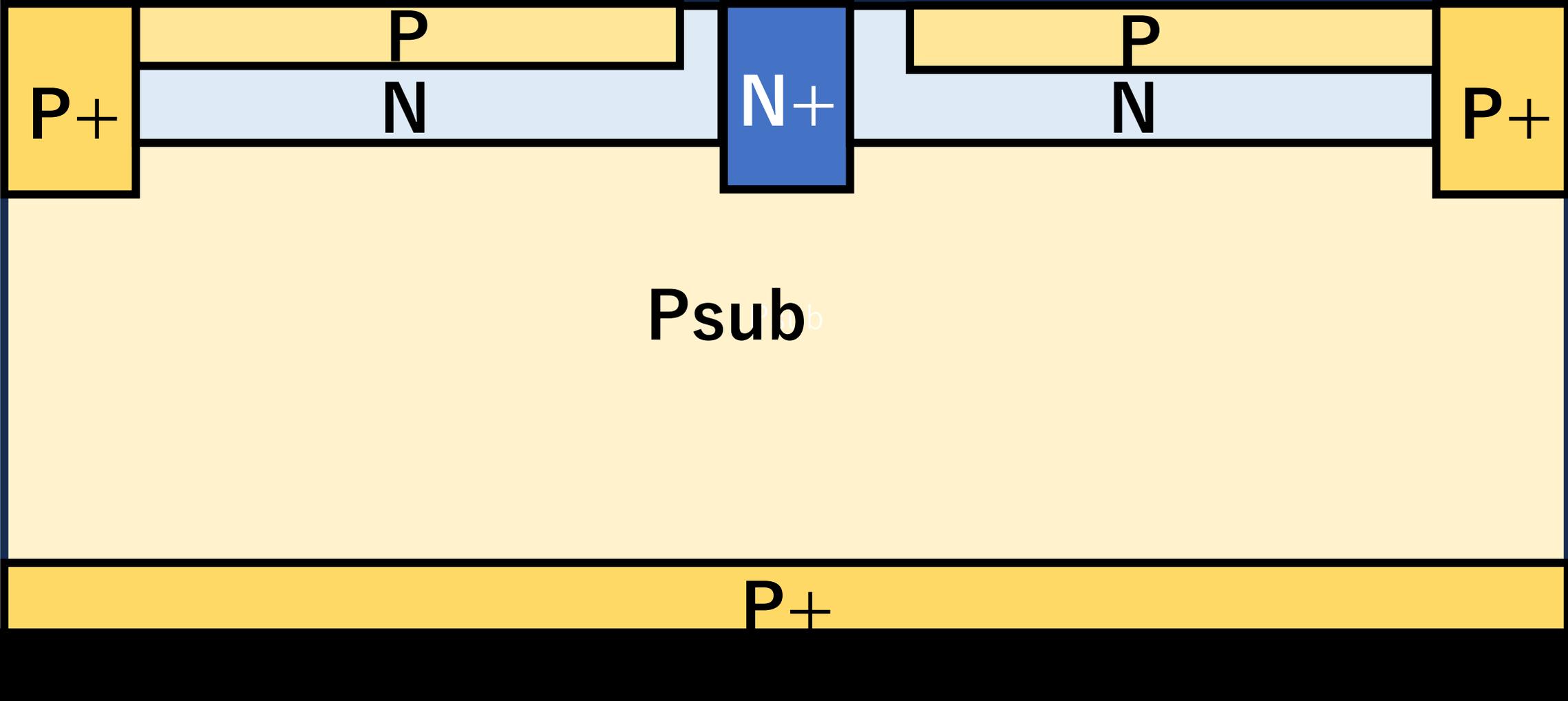


PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

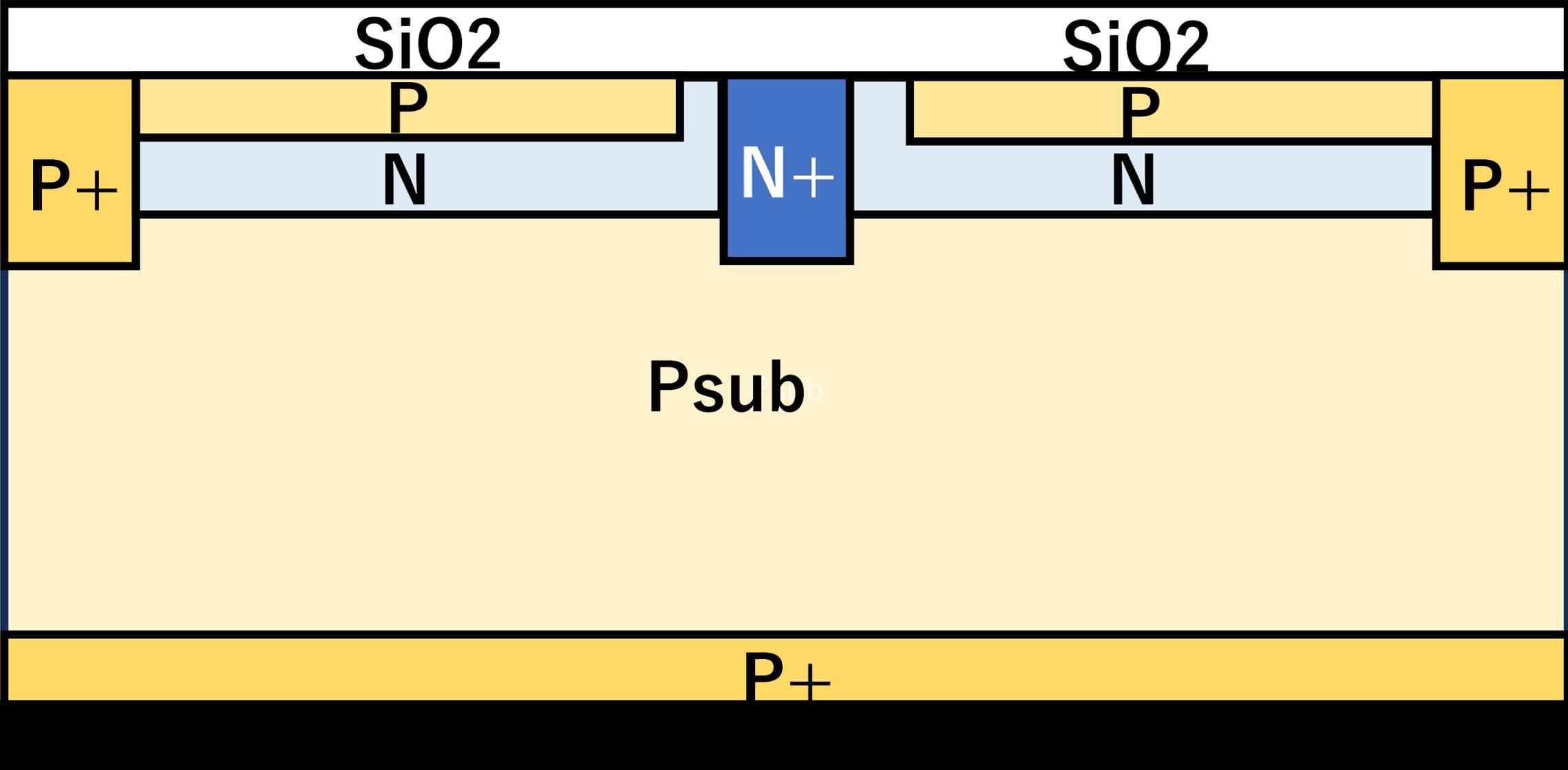


PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

STEP_005A

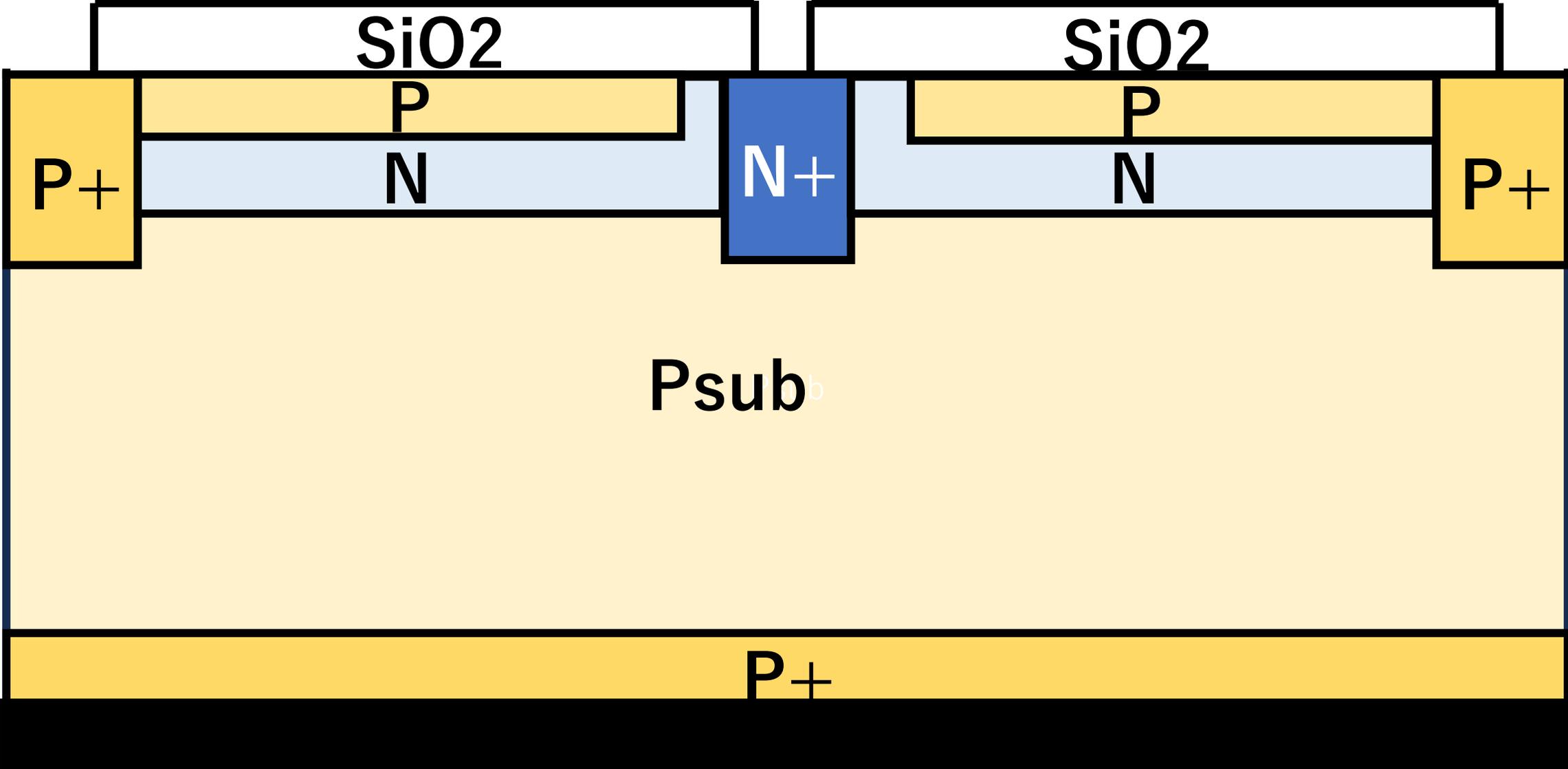


PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

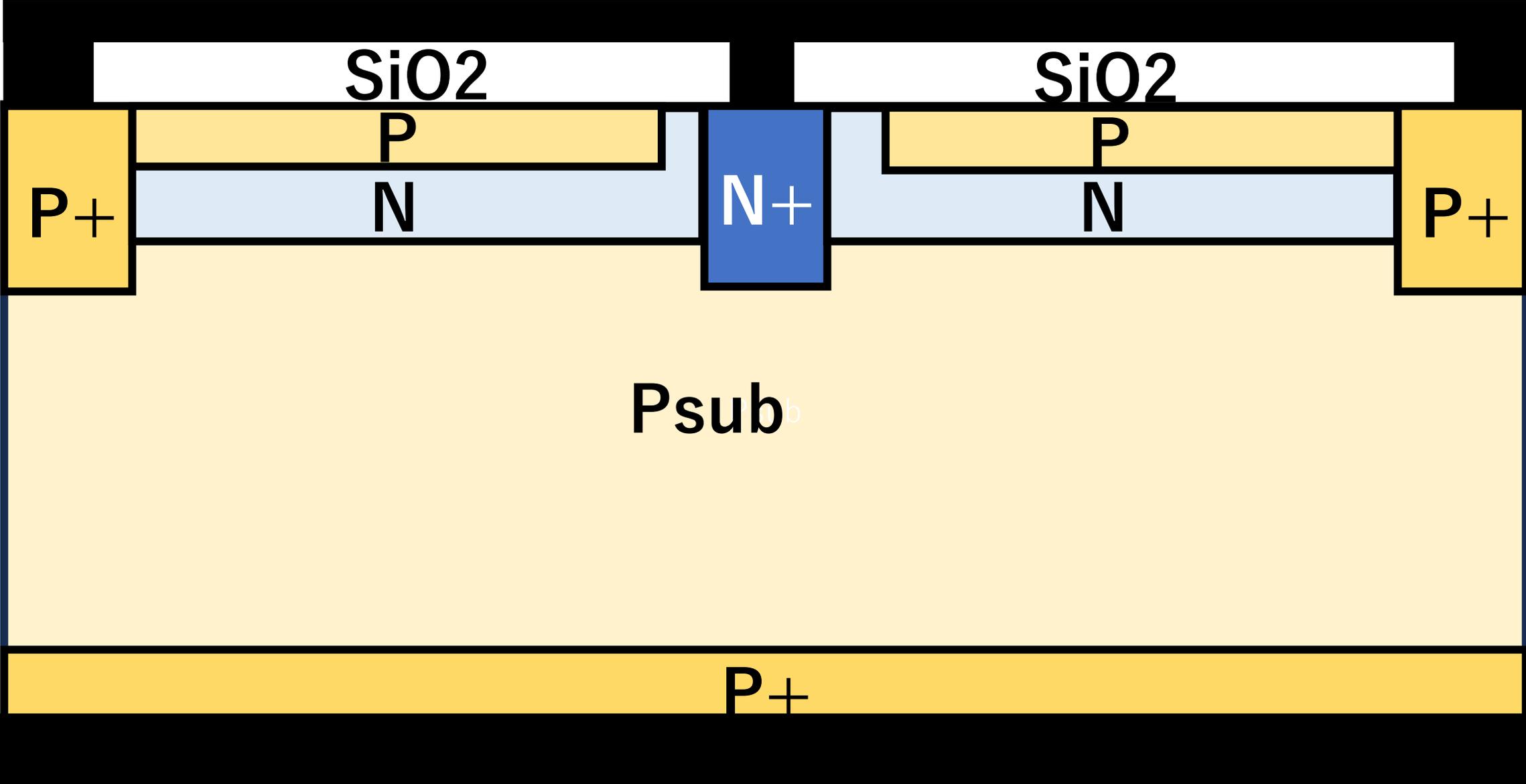


PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

STEP_007

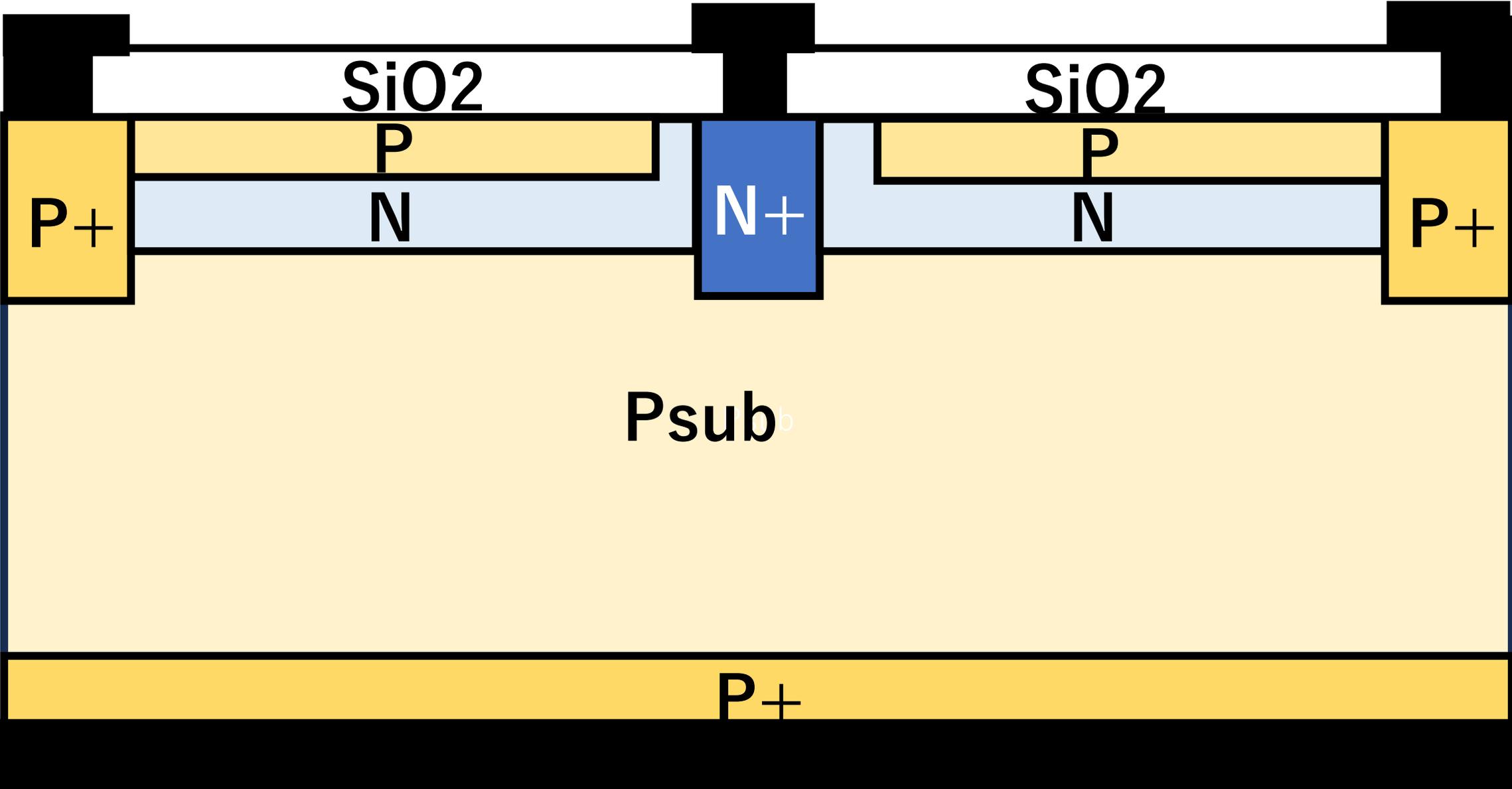


PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

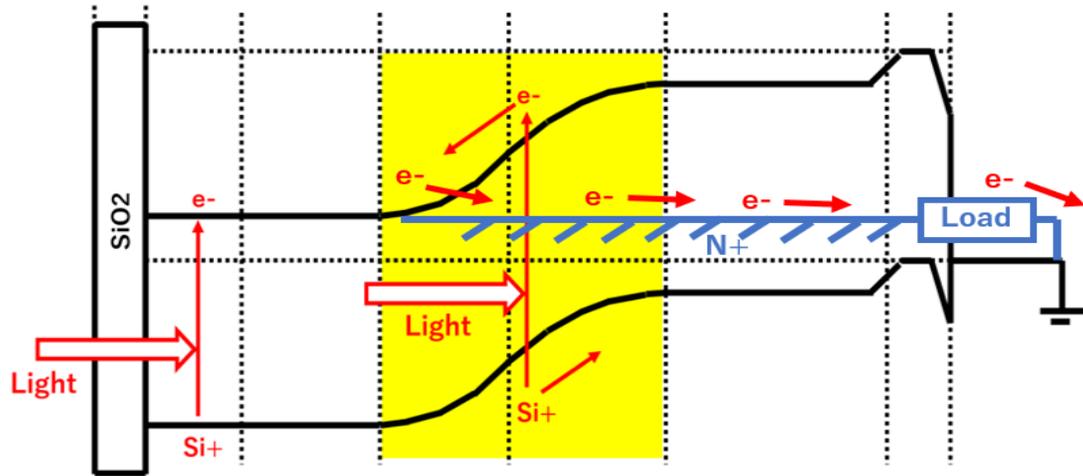
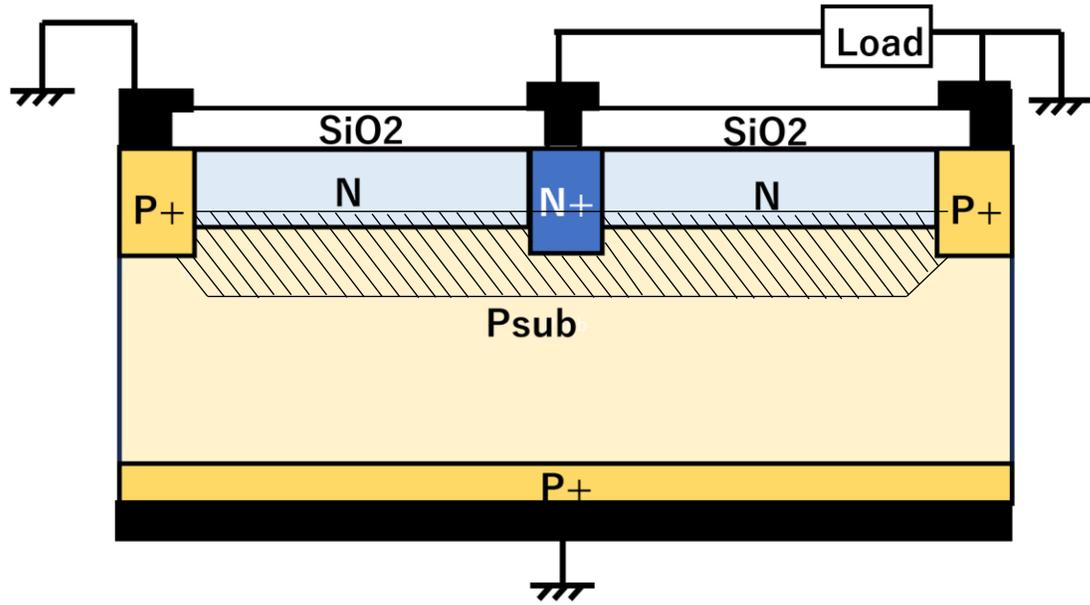


PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

STEP_009

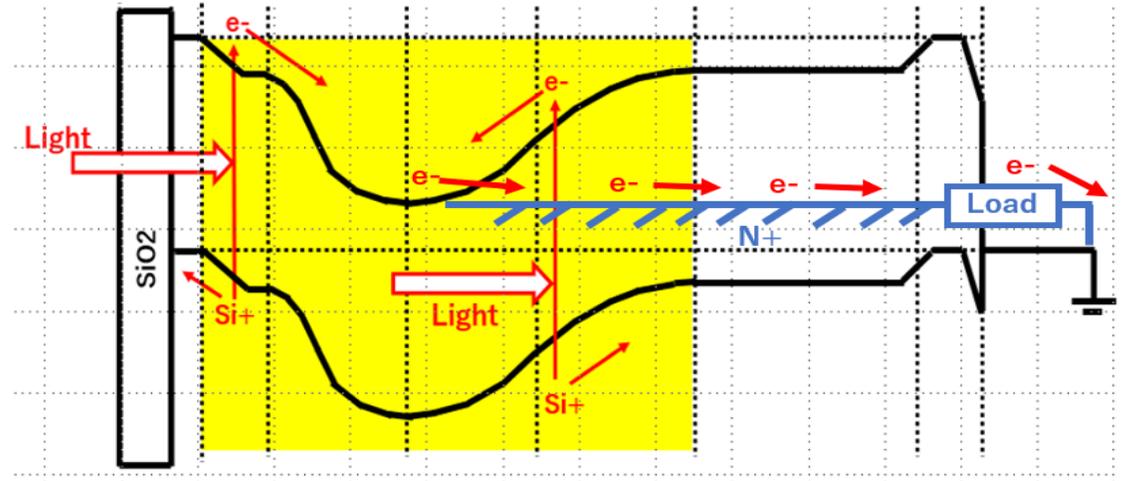
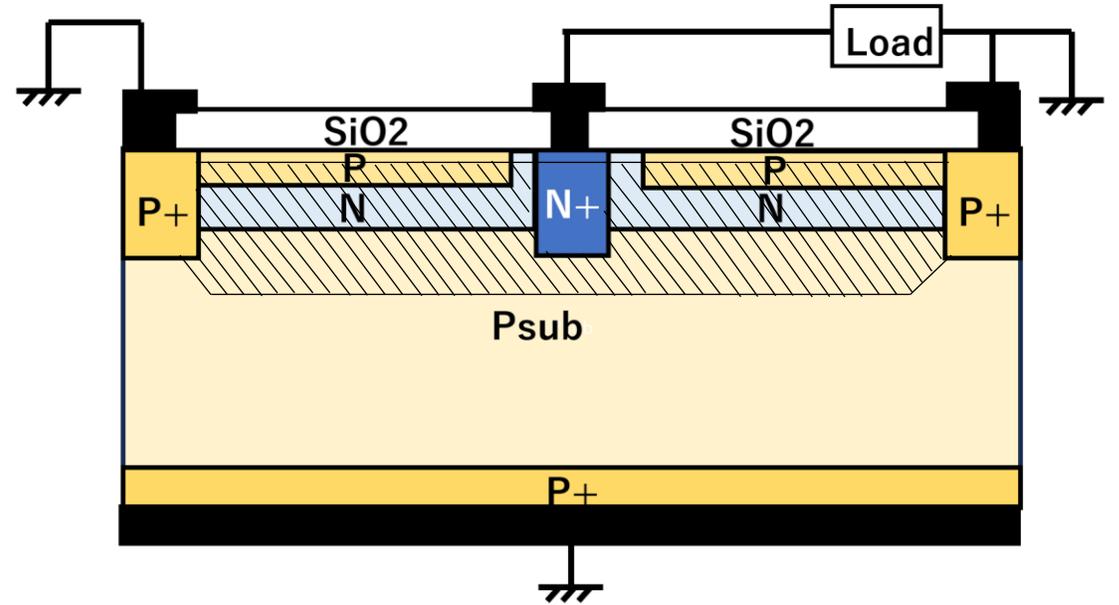


Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell



Quantum Efficiency $\sim (X_n + X_p)$

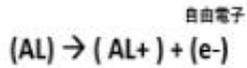
PNP Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell



Quantum Efficiency $\sim (X_s + 2X_n + X_p)$

半導体とは？

●金属（アルミ等）は電気を通す。



電氣的に中性なアルミ原子（Al）から光や常温の熱で、自由電子(e-)が飛び出して自由にアルミの原子の塊の中を動きまわる。

●絶縁体（ガラスやダイヤモンド等）では原子内引力が強く、軌道電子が逃げる事ができず、絶縁体には自由電子(e-)がない。

●半導体（シリコン等）も引力が強く軌道電子が逃げる事があまりできない。自由に動ける電子(e-)が少ない。しかし不純物原子（ボロンやヒ素）を加えると、自由電子(e-)、またはホール(Si+)が生まれ、自由に半導体の中を動きまわり電気を通す。不純物原子濃度は制御可能。

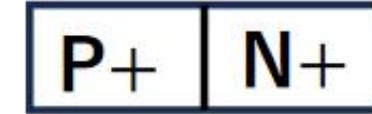
(1) Diode before 1948



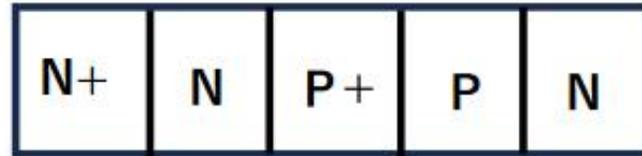
(2) Bell Lab, 1948 Bip Transistor



(3) Esaki Diode



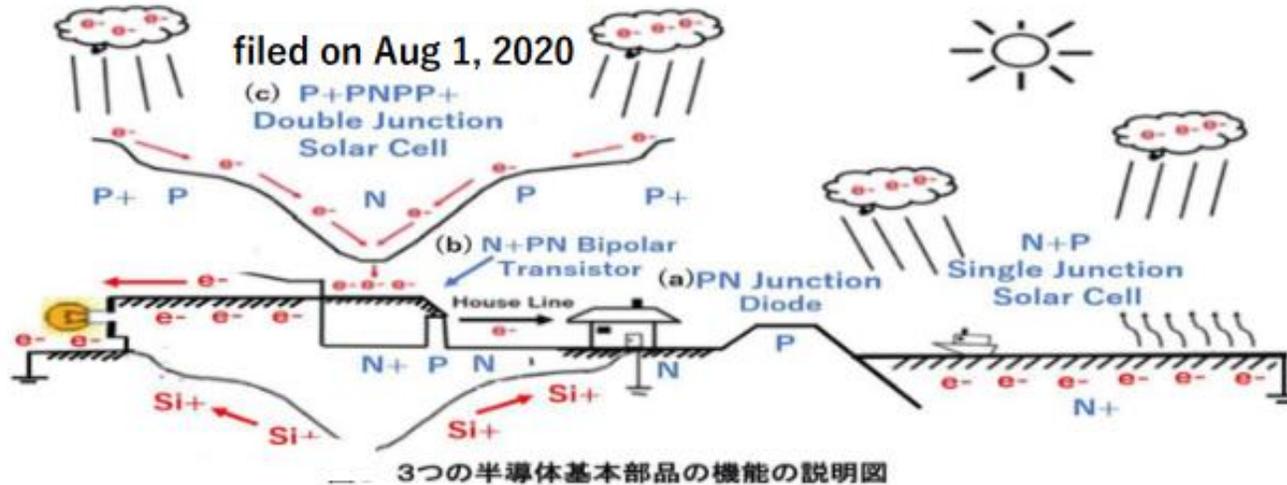
(4) Sony, Bip Transistor in 1950s



(5) Sony, Photodiode in 1975



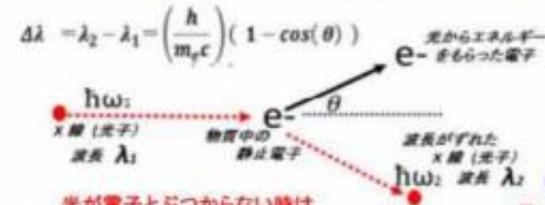
JPA2020-131313



(a)堤防としてのPN接合、(b)水門としてのN+PN接合、(c)ダムとしてのP+PNPP+接合。

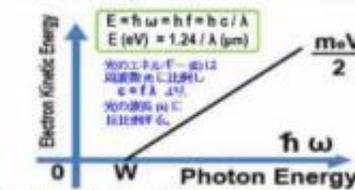
●光は波でもあり、また粒子(光子)でもある (Albert Einstein 1900)

- 玉突きと同じ古典物理モデルで記述できる。
- 反射光の角度と波長の関係から電子の質量が求まる！



光が電子とぶつからない時は $\theta = 0$ で光は直進し波長の変化はない。

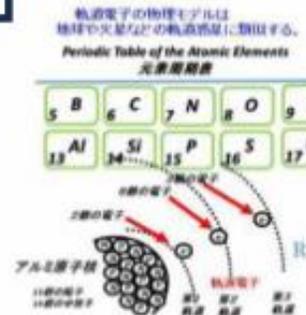
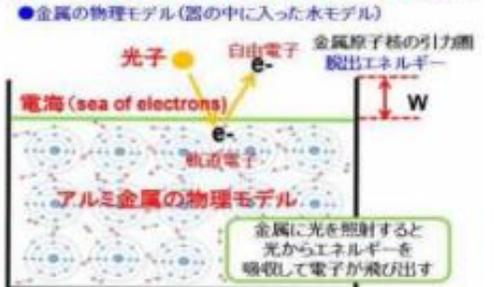
光の速度 $C = 2.99792458 \times 10^{10}$ cm/sec
 Plank 定数 $h = 6.62606957 \times 10^{-34}$ Joule*sec
 電子の質量 $m_e = 9.10938291 \times 10^{-31}$ kg



Work Function (W)の値から金属の種類が判明する。



(脱出エネルギー) = 半導体の Energy Gap
 For Silicon, $E_g = 1.10$ eV and $\lambda = 1.12 \mu m$

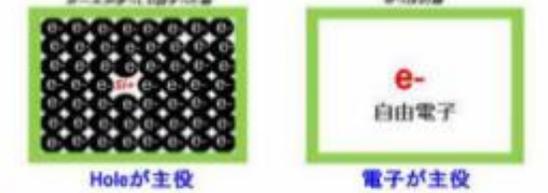


●自由電子は当然空間を自由に浮遊し移動する。しかし、結晶体の中でも、結晶体の原子核の引力圏の外では自由に電子は浮遊することができる。

●シリコン結晶体では、電子を1つ失ったシリコンイオン(Si+)は隣接する中性のシリコン原子から電子を1つ盗み、中性にもどる。その電子を盗まれた、シリコンイオン(Si+)は、また別の中性のシリコン原子から電子を盗む。ホールはこうして移動する。

●原子構造(原子核と電子)と太陽系(太陽と惑星)の類似

- アルミ原子(中性) $_{13}Al$ = アルミイオン(Al^+) $_{13}$ + 自由電子(e^-)
- シリコン原子(中性) $_{14}Si$ = シリコンイオン(Si^+) $_{14}$ + 自由電子(e^-)
- りん原子(中性) $_{15}P$ = りんイオン(P^+) $_{15}$ + 自由電子(e^-)
- ボロンの原子(中性) $_{5}B$ + 自由電子(e^-) = ボロンイオン(B^+) $_{5}$



鉄腕アトムは半導体部品で構成され創られています。
鉄腕アトムの賢い電子の目は太陽の光を吸収して
光エネルギーを電気エネルギーに変換します。
鉄腕アトムの賢い電子の目は太陽電池でもあります。
賢い電子の目は半導体で造られます。

半導体とは？

2024 02 01 半導体とは？萩原良昭.pdf

2024 02 01 半導体とは？萩原良昭.mp4

<http://www.aiplab.com>

<https://locomtec.jp/萩原aips研究所>

