

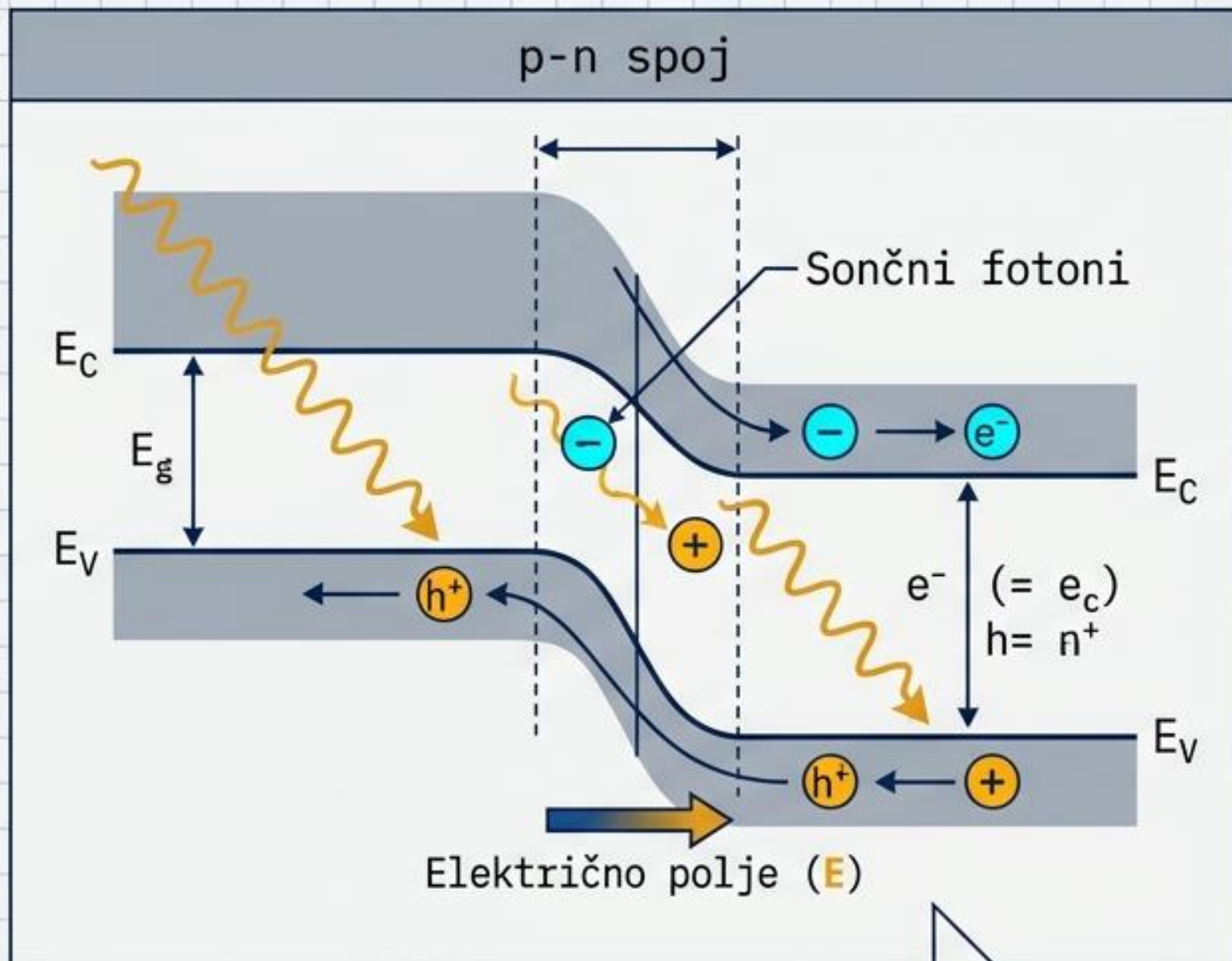
**STATUS:
PREGLED STANJA**

Inženirska analiza: Silicij, perovskit in prihodnost fotovoltaike

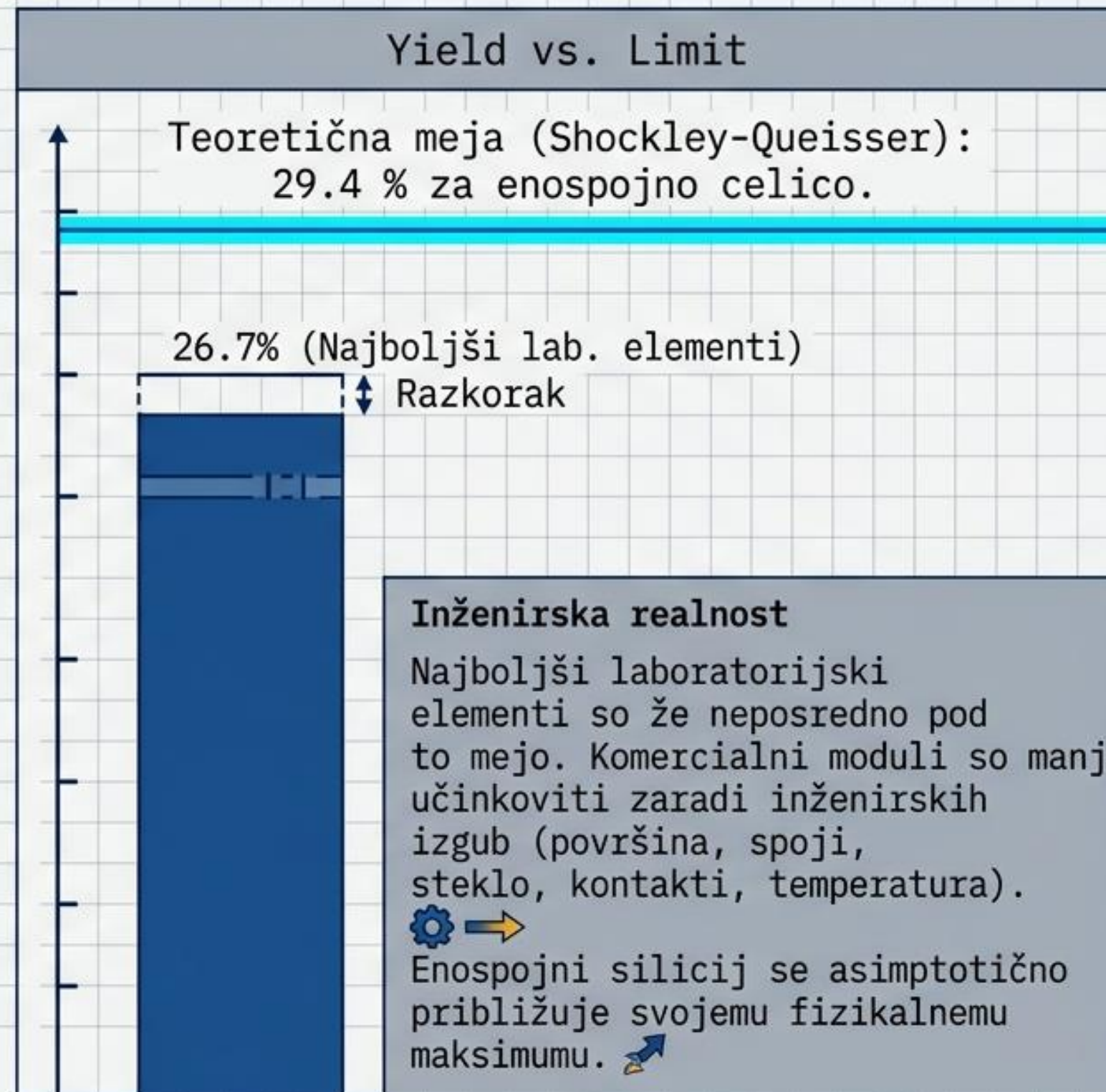
Tehno-ekonomska in LCA primerjava
(c-Si vs. PSC) za načrtovanje
fotonapetostnih sistemov.
fotonapetostnih sistemov.



Fizikalna meja klasičnega silicija

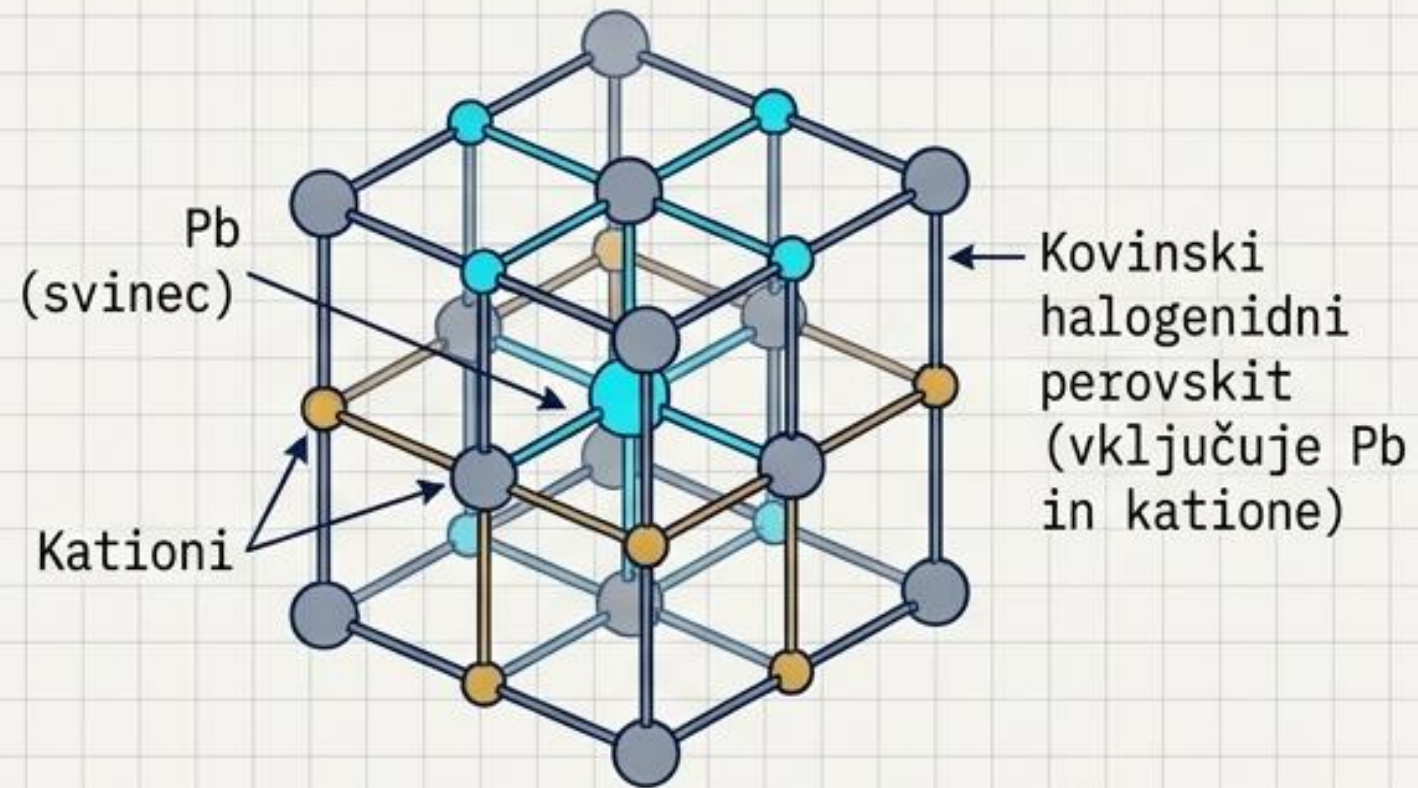


Delovanje: Sončni fotoni ustvarijo elektrone in vrzeli v kristalnem siliciju (c-Si); električno polje p-n spoja jih loči za nastanek toka.



Perovskit: Nastavljiva energijska vrzel

Materialna struktura

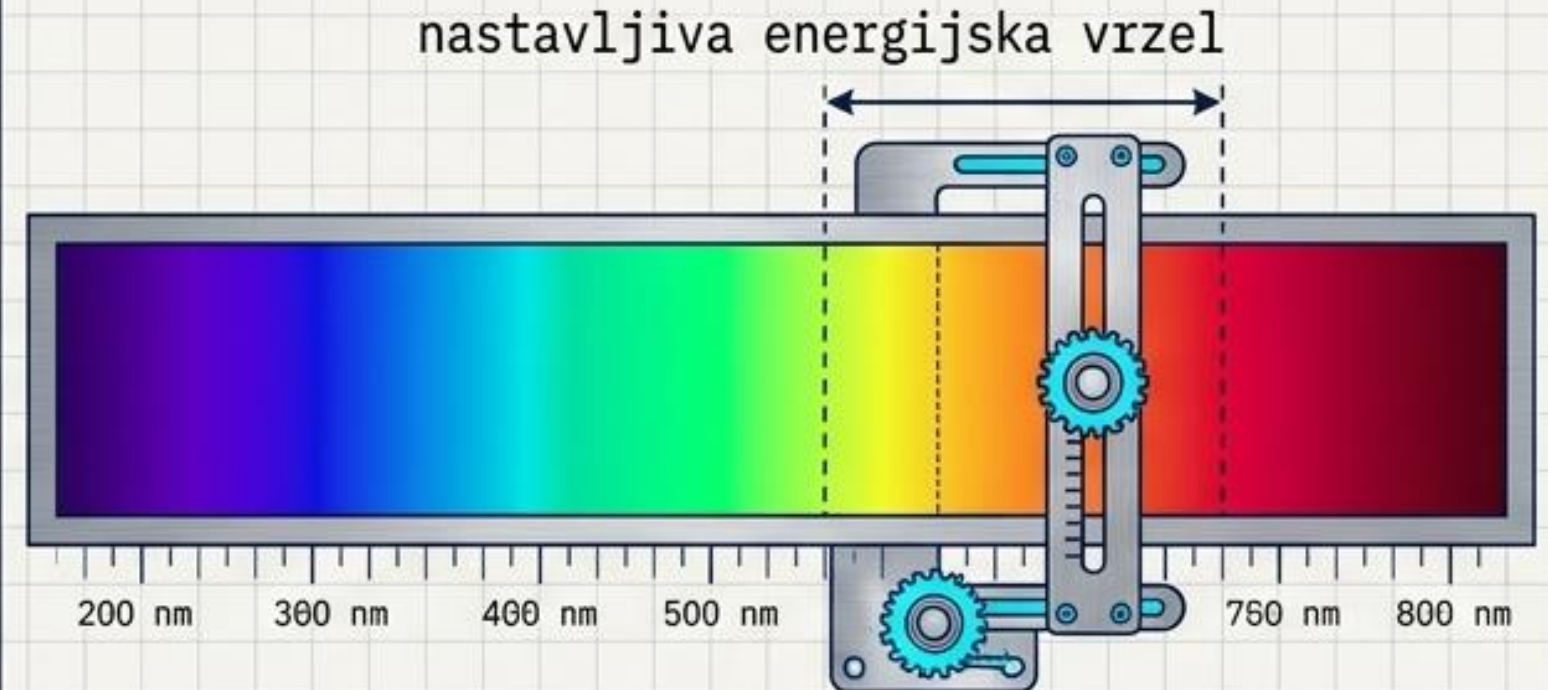


Material: Kovinski halogenidni perovskiti (običajno vključujejo svinec in katione).

Glavne fizikalne prednosti:

- Zelo močna absorpcija (omogoča ultratanke sloje).
- Potencial nizkotemperaturne proizvodnje.
- Nanašanje na steklo ali folijo.

Optična nastavitev

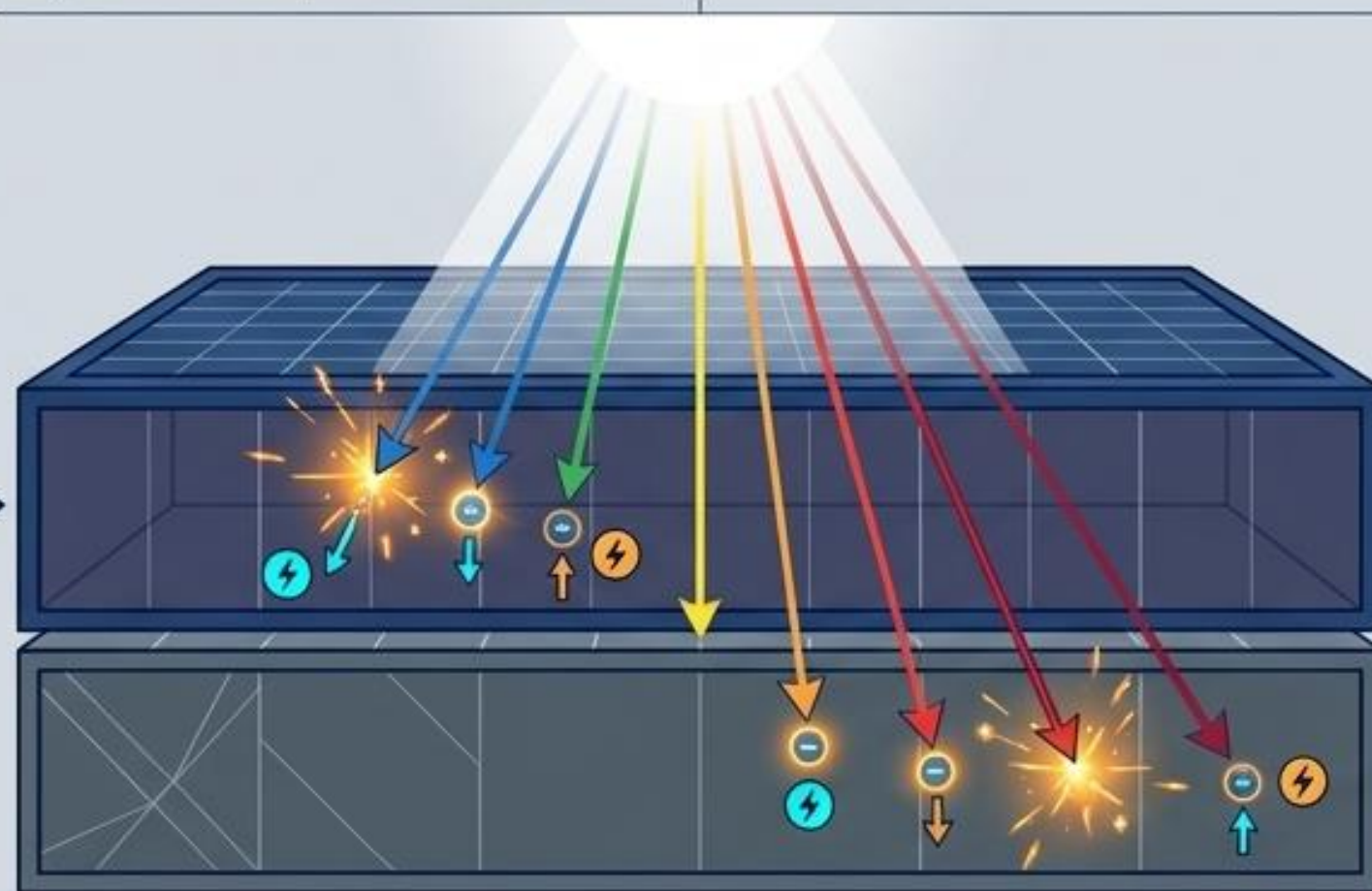


Ključni parameter:
Energijska vrzel je prilagodljiva.
Idealna enospojna zasnova omogoča
teoretično mejo približno 33 %.

Tandemska arhitektura: Spektralna delitev

Mehanizem: Perovskit ne nadomesti silicija, temveč ga nadgradi. Plasti izkoriščata različna dela sončnega spektra.

The Spectrum Splitter Visual



Zgornja celica (Perovskit): Absorbira visokoenergijske fotone (optimizirana energijska vrzel).

Spodnja celica (Silicij): Izkorišča preostanek spektra.

Teoretična meja (Dvospotni tandem): ~ 43 %
Raziskovalni rekordi so trenutno okoli sredine 30 odstotkov.



Tržna gravitacija kristalnega silicija

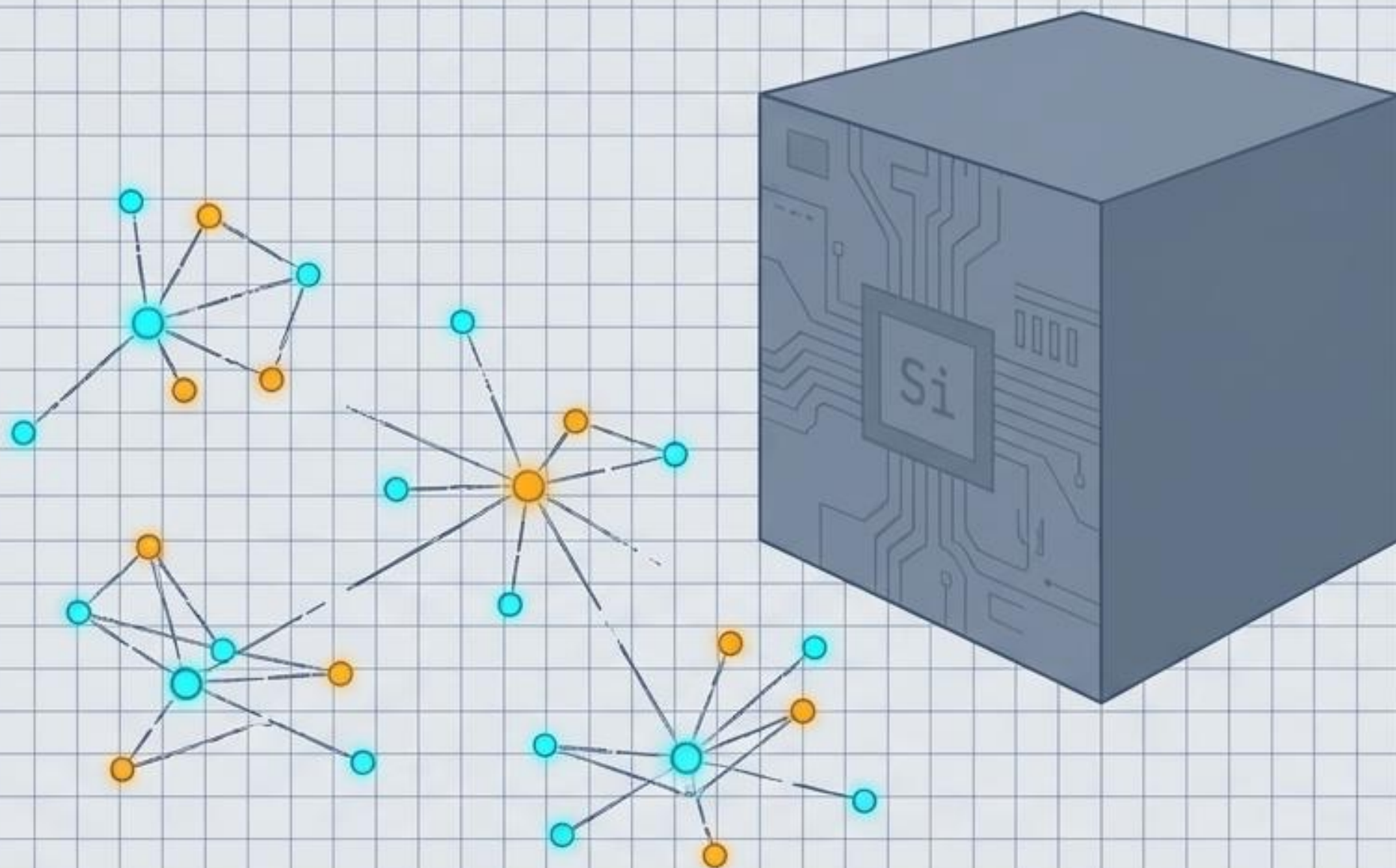
Zakaj je silicij tako poceni? Zelo velike serije, avtomatizacija, optimizirana dobavna veriga, standardizacija, močna konkurenca.

Tržni delež (2025):
~ 98 % svetovne
proizvodnje modulov.

Geopolitična koncentracija
(2024):
Kitajska obvladuje ~ 86 %
proizvodnje modulov.

Tržni akterji (Tier 1):
LONGi, JinkoSolar,
Trina, JA Solar,
Tongwei.

Perovskit: Od laboratorija do zgodnje komercializacije



Stanje trga: Razdrobljen, nišen, v fazi pilotnih ali demonstracijskih linij. Ni še primerljiv z množičnim trgom silicija.

Ključni akterji:

Node 1:

Oxford PV (UK/DE): Prve komercialne dobave tandemskih modulov v letu 2024.

Node 2:

UtmoLight (CN): Napovedana 1 GW linija.

Node 3:

Saule Technologies: Poudarek na fleksibilnih moduli.



Inženirsko opozorilo: Laboratorijski rekord celice na cm^2 ni enakovreden stabilnemu komercialnemu modulu velike površine z 25-letno garancijo.



Strateška prednost integracije

Paradoks inovacije: Veliki silicijevi proizvajalci (LONGi, JinkoSolar) že intenzivno razvijajo tandemske rešitve.



Tehno-ekonomska analiza (CAPEX vs. LCOE)

CAPEX & Market Reality

Teoretična prednost PSC:

Nizki stroški materiala in procesiranja.

Dejanska tržna ovira:

Stroški so danes visoki zaradi nizkih izkoristkov v proizvodnji, majhnih serij, dragega nadzora kakovosti (QC), zahtevne enkapsulacije in stroškov garancijskih rezerv.

LCOE Projections

Referenčni model (2025):

Za trenutno PSC tehnologijo je ocenjen strošek 0,57 USD/W in LCOE 18-22 centov/kWh.

0,57/W

centov/kWh.

Prag preloma:

Perovskit postane konkurenčen c-Si šele pri učinkovitosti nad 25 % in dokazani življenjski dobi okoli 25 let.

Analiza življenjskega cikla (LCA): Izhodišče silicija

Ogljični odtis



Ogljični odtis (c-Si): 25-44 g CO₂-ekv/kWh
(za mono-Si ~20g v optimiziranem scenariju).

Glavni viri: Proizvodnja polisilicija,
rast kristala, energetski miks proizvodnih
obratov, aluminij, steklo.

Vodni odtis



Vodni odtis (c-Si): Večinoma povezan s
proizvodnjo in čiščenjem silicija,
izdelavo rezin ter vodo za elektriko (ne
z obratovanjem na lokaciji).

Opomba: Vpliv je močno odvisen od lokacije proizvodnje in življenjske dobe.

Pogojna enačba okoljskega vpliva (LCA)

$$\left[\text{Visok izkorištek} \right] \times \left[\text{Dolga življenjska doba} \right] \times \left[\text{Reciklabilnost} \right] = \left[\text{Ogljični odtis} < 20\text{g CO}_2/\text{kWh} \right]$$

Potencial PSC

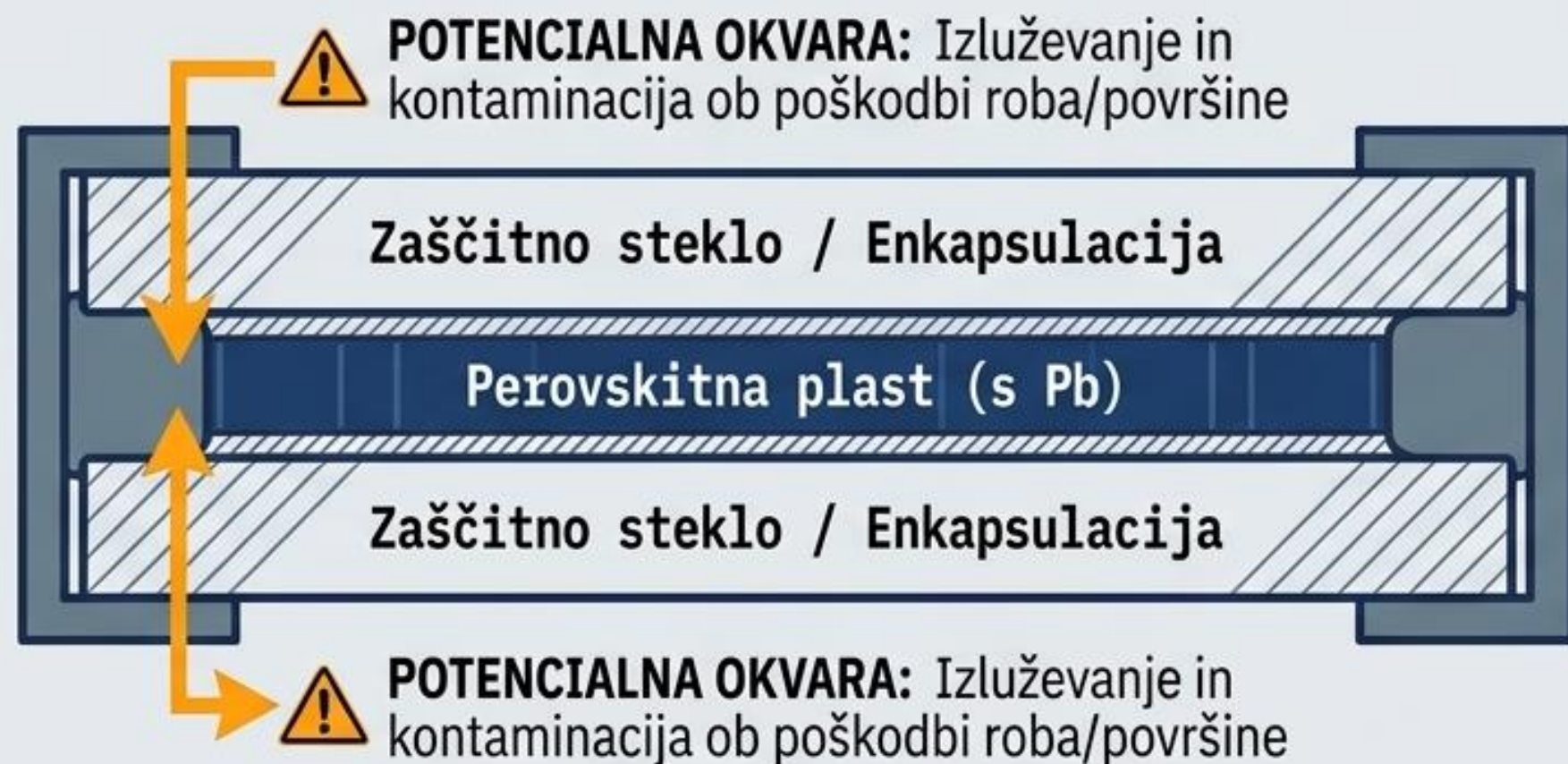
- Tanjša aktivna plast, nižje temperature izdelave = nižja poraba energije. Novejše študije modelirajo 10-25 g CO₂-ekv/kWh.
- **Inženirsko pravilo:** Višja učinkovitost zmanjša materialni vpliv na kWh le, če modul dovolj dolgo ohrani lastnosti.

Tveganje degradacije

Če modul hitro degradira, se proizvodni vpliv (steklo, substrati) razporedi na manj proizvedene elektrike. Odtis na kWh tako postane slabši od silicijevega.

Kritična inženirska ovira: Toksičnost in svinec (Pb)

Visoko učinkovite perovskitne celice vsebujejo svinec (Pb). Količina je masno majhna, a okoljsko zelo problematična.



Zahteve za inženirsko validacijo:

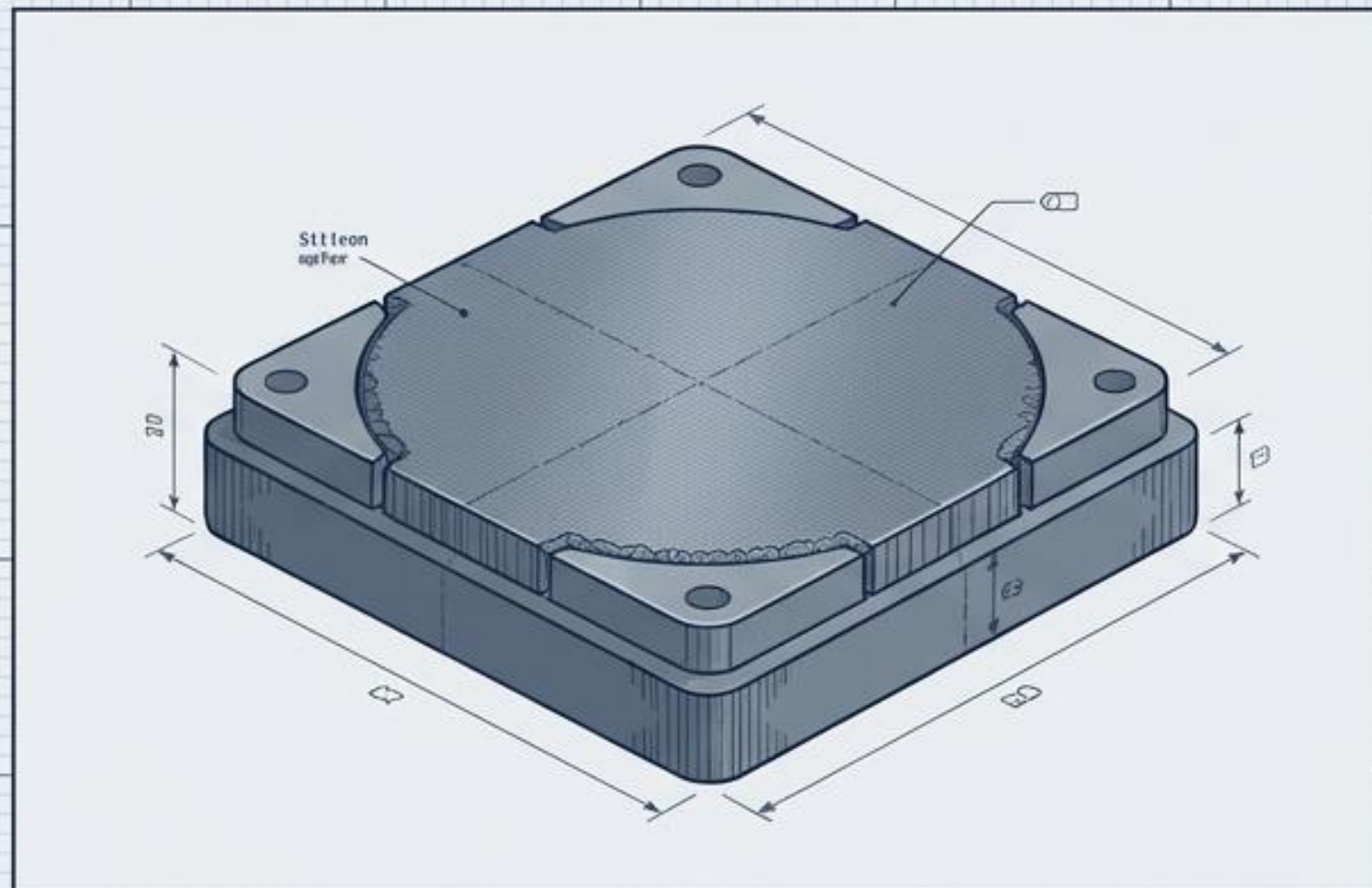
1. **Popolna enkapsulacija**
(preprečevanje izluževanja Pb v okolje ob stiku z vodo).
2. **Varnost ob fizični poškodbi**
modula (toča, lom).
3. **Industrijsko izvedljiv**
postopek ločevanja in
recikliranja svinca ob koncu
življenjske dobe.

Okoljske prednosti iz prejšnje prosojnice so nične brez rešenega nadzorovanega zbiranja in krožnega toka materialov.

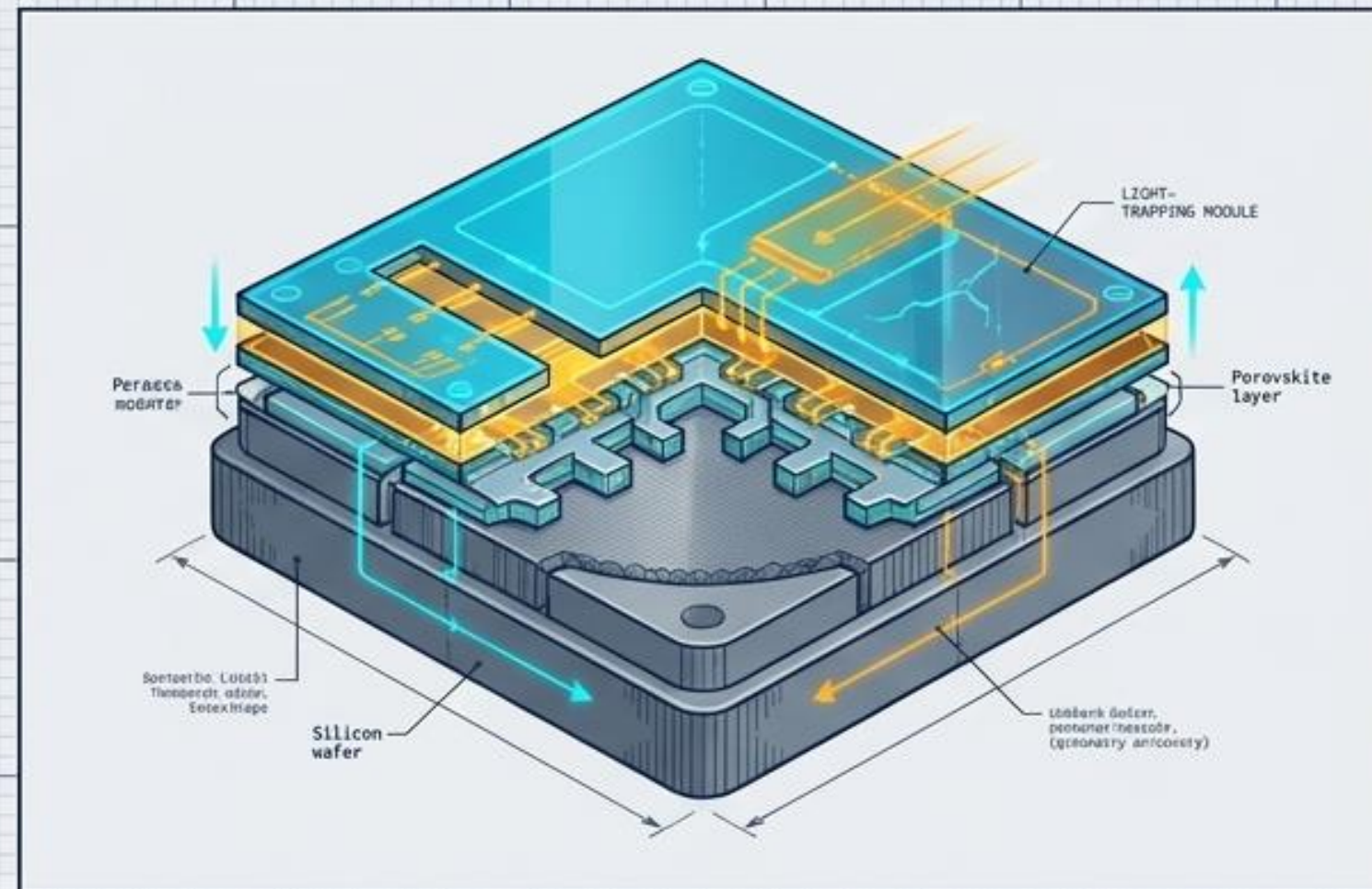
Diagnostična matrika: c-Si vs. PSC vs. Tandem

	Kristalni silicij	Samostojni perovskit	Perovskit-silicij tandem
Tehnološka zrelost	Zelo visoka (98% trga)	Nizka (Pilotna)	Zgodnja komercialna
Teoretična meja - Izkoristek	~29-30%	~33%	~43%
Glavna prednost danes	Cena, zanesljivost	Majhna masa, fleksibilnost	Najvišji izkoristek na površino
Ključna inženirska težava	Energetska zahtevnost, fizična meja	Stabilnost, svinec	Integracija obeh slojev, cena
Življenjska doba	Dokazano 25-30 let	Še ni dokazana	Še ni dokazana v množičnem obratovanju

Končna sinteza: Evolucija, ne revolucija



Sklep: Klasični silicij ostaja nesporni industrijski standard. Samostojni perovskit ga na kratki in srednji rok ne bo nadomestil zaradi tržne gravitacije c-Si in nerešenih vprašanj stabilnosti (LCOE) ter svinca (LCA).



Prihodnost je Tandem: Zmagovalna inženirska arhitektura je 'bolt-on' nadgradnja. Perovskitna zgornja celica bo tehnološko rešila silicij pred njegovo fizikalno mejo, ob pogoju, da bo izpolnila tri zahteve: **Učinkovitost >30%, Življenjska doba = 25 let, in Varna krožnost materialov (Pb).**