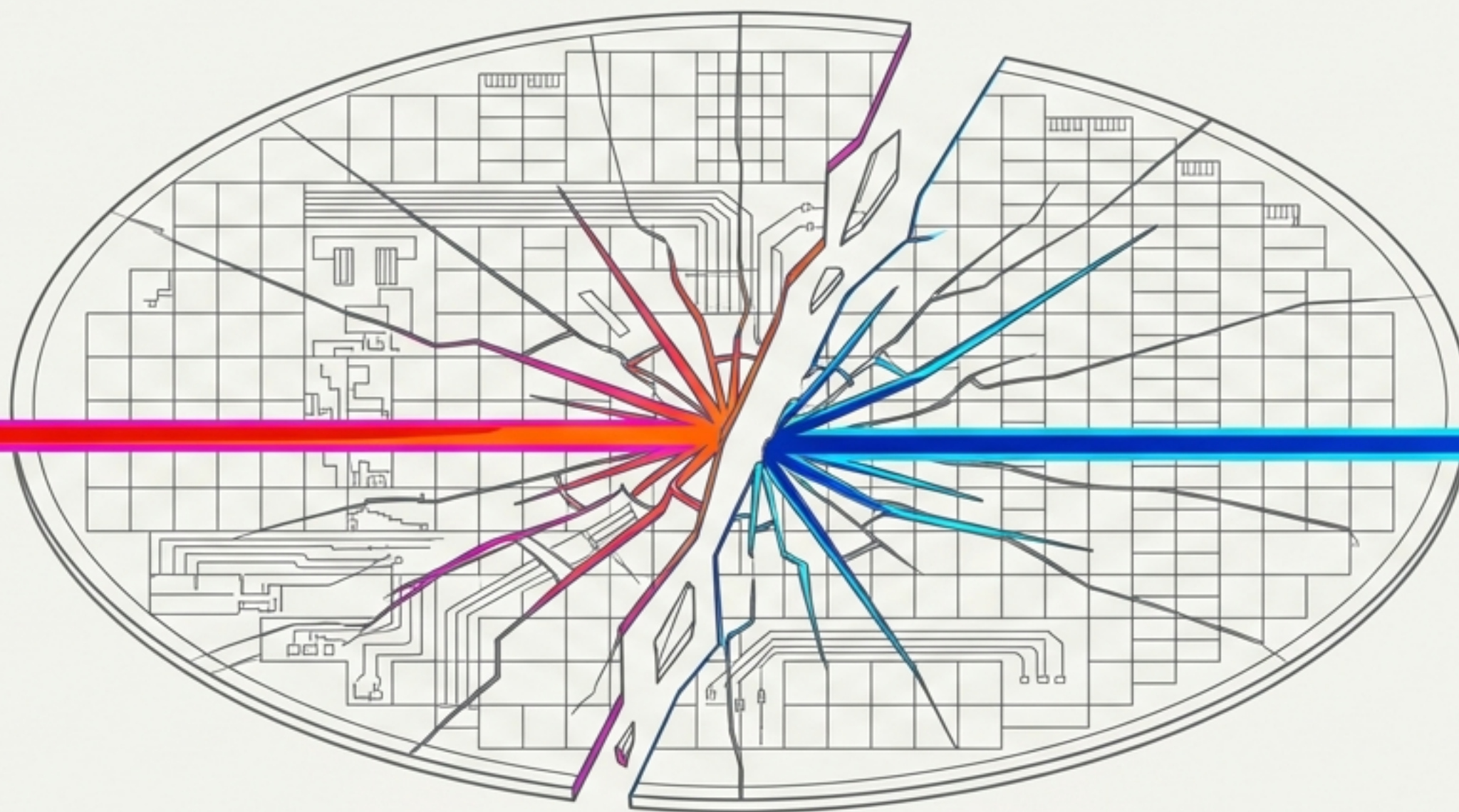
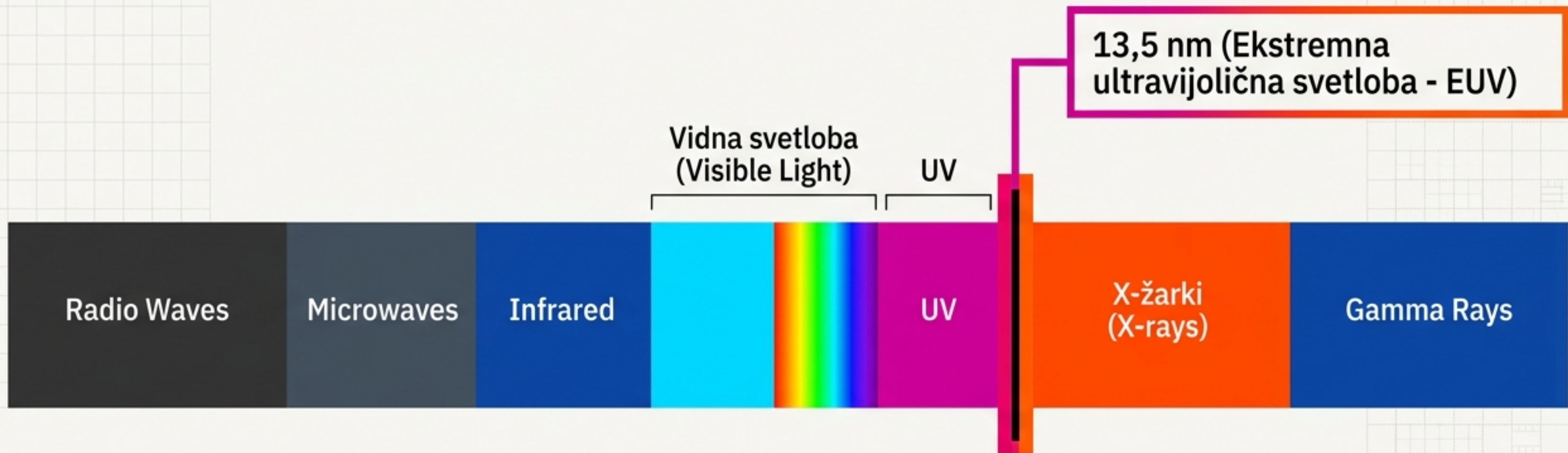




Nova fizika izdelave čipov

Kako tehnologija pospeševalnikov delcev (SSMB) izziva monopol na meji mogočega.

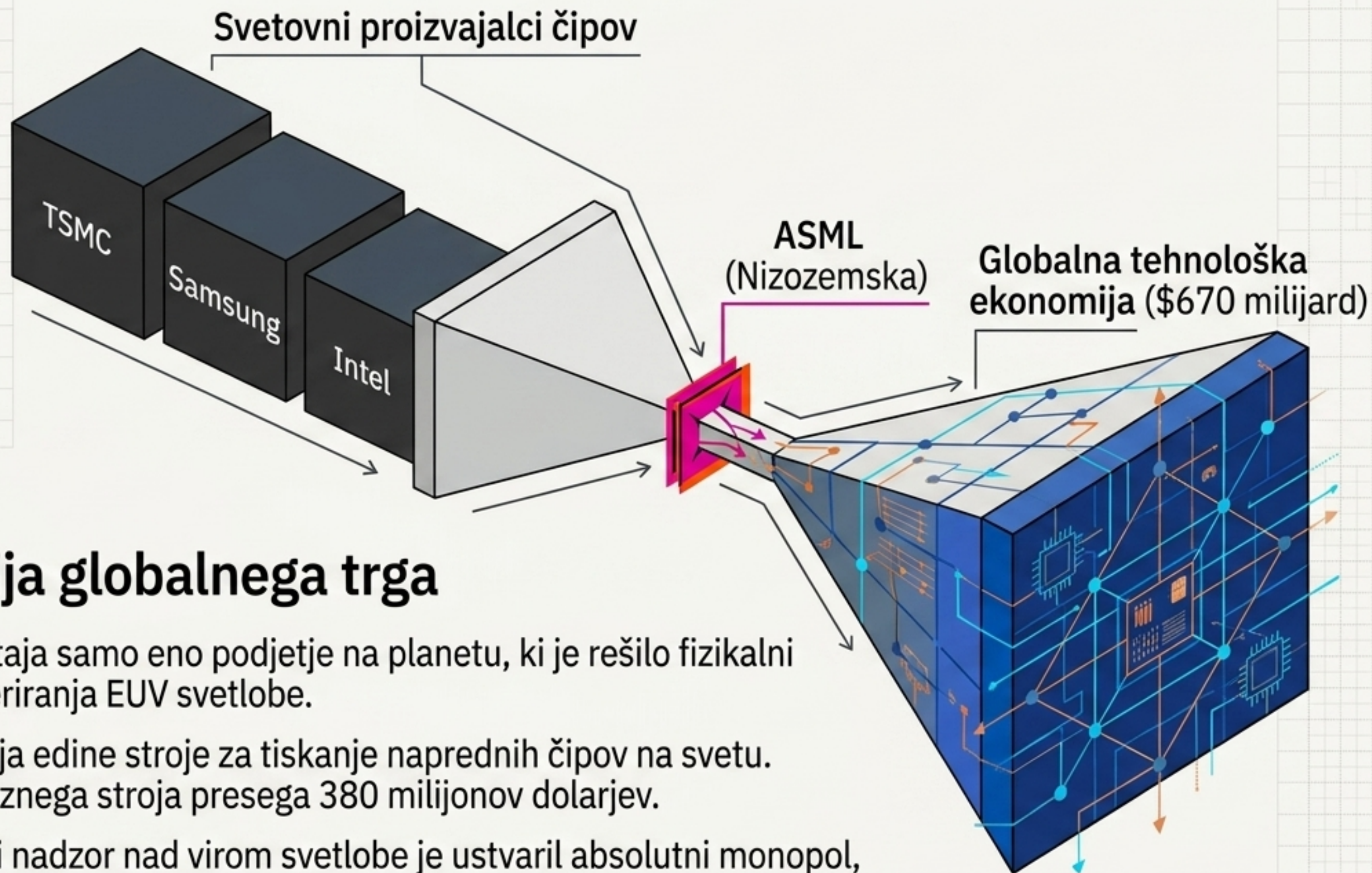


Fizikalna meja Mooreovega zakona

Za tiskanje najnaprednejših vezij sodobnega sveta potrebujemo svetlobo z valovno dolžino natanko 13,5 nanometra (EUV).

- Težava: Taka svetloba na Zemlji v uporabni obliki ne obstaja.

Ker ne moremo kupiti EUV žarnice, moramo to svetlobo inženirsko ustvariti iz nič. Ta edinstvena fizikalna omejitev narekuje celotno globalno industrijo polprevodnikov.

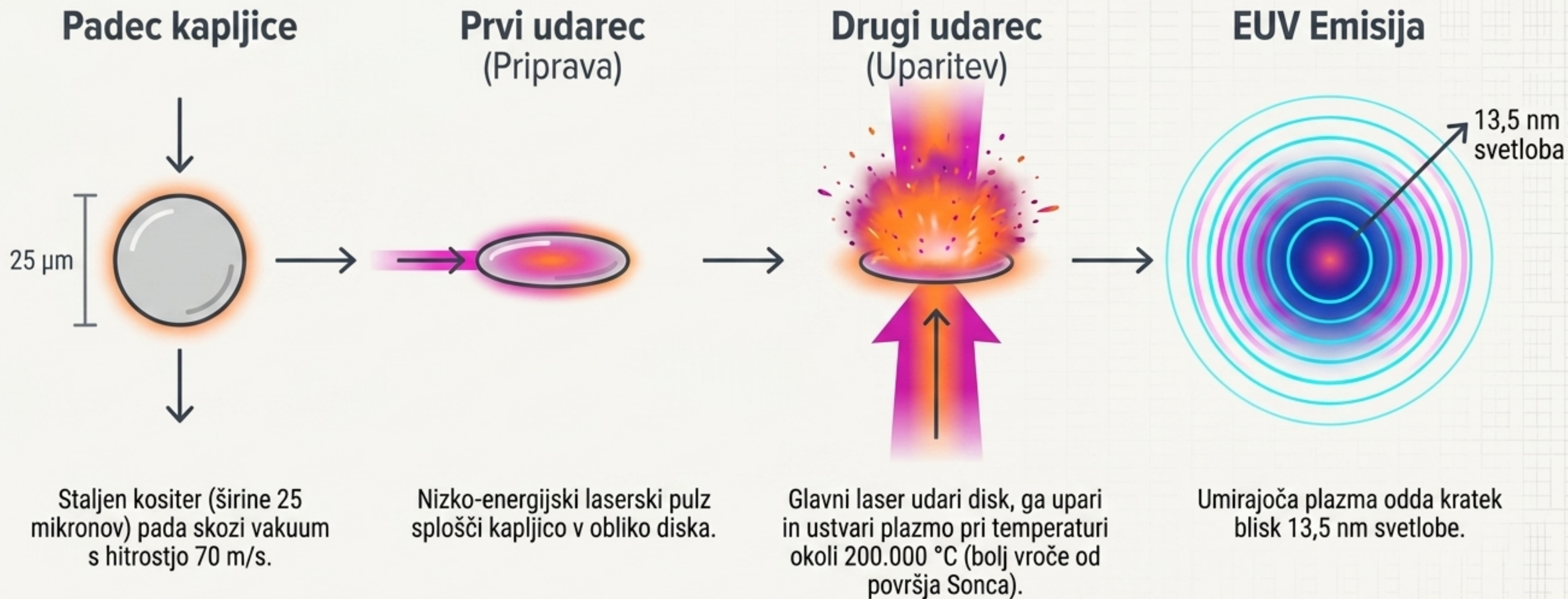


Asimetrija globalnega trga

Trenutno obstaja samo eno podjetje na planetu, ki je rešilo fizikalni problem generiranja EUV svetlobe.

ASML proizvaja edine stroje za tiskanje naprednih čipov na svetu. Cena posameznega stroja presega 380 milijonov dolarjev.

Ta ekskluzivni nadzor nad virom svetlobe je ustvaril absolutni monopol, ki definira geopolitično in tehnološko moč 21. stoletja.



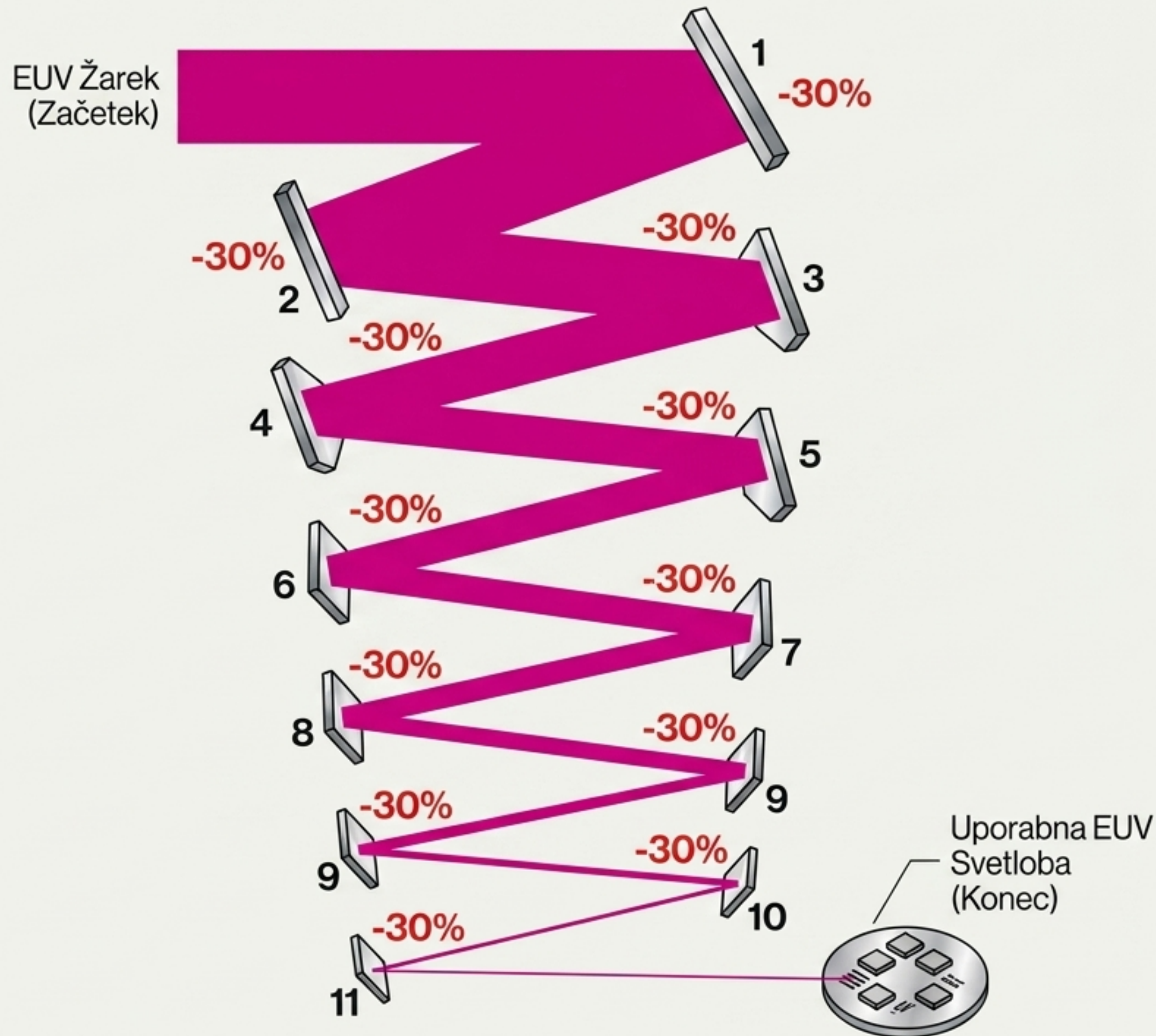
Frekvenca: Ta cikel se mora ponoviti 50.000-krat vsako sekundo, mesece dolgo, brez ene same napake. (Stroboskopski učinek).

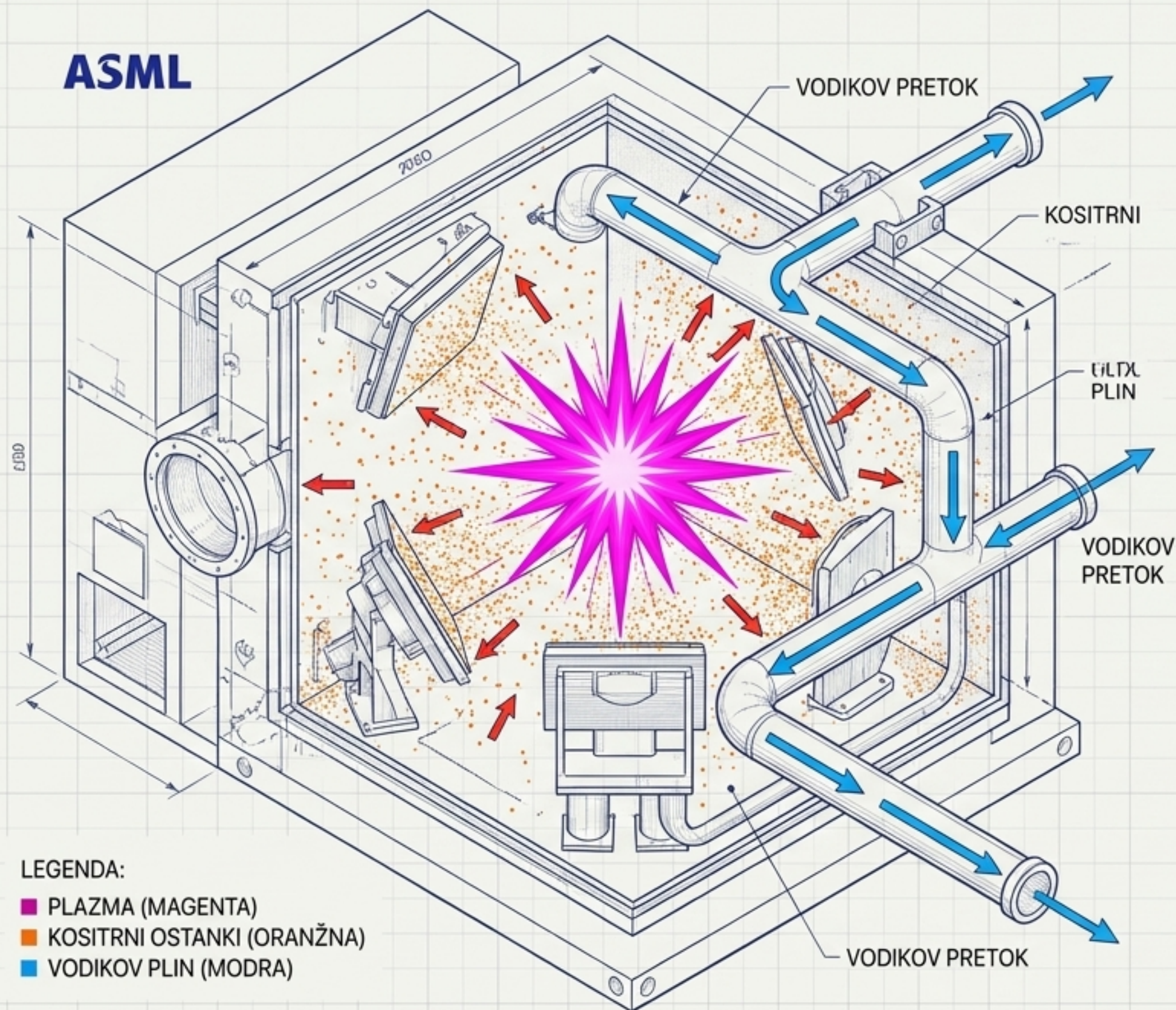
Kaskada neučinkovitosti

EUV svetloba je tako reaktivna, da jo absorbira skoraj vse – celo zrak in steklene leče. Zato ASML uporablja sistem izjemno ravnih zrcal v popolnem vakuumu.

Matematika izgube:

- Svetloba se na poti do rezine odbije 11-krat.
- Pri vsakem odboju zrcalo absorbira 30 % svetlobe.
- Posledica: Začetni laserji morajo generirati več deset kilovatov moči (skozi 5 stopenj ojačanja), da na koncu na silicij pride le nekaj sto vatov uporabne EUV svetlobe.





Inženirski kompromisi eksplozij

Sistem plazme, ustvarjene z laserjem (LPP), je neverjeten inženirski dosežek, a prinaša brutalne posledice za vzdrževanje.

- **Mikroskopski ostanki:** 50.000 eksplozij kositra na sekundo ustvari hlape in kovinske ostanke, ki prekrijejo občutljivo notranjost.
- **Čiščenje v živo:** Sistem mora nenehno črpati vodikov plin, da kemično odstrani kositer iz neprecenljivih zrcal.
- **Zastoj (Downtime):** Stroj v vrednosti 380 milijonov dolarjev zahteva stalen nadzor, pogosto menjavo zrcal in obsežna vzdrževalna dela, med katerimi ne proizvaja čipov.

2010

Teoretični temelj (Stanford, ZDA)
- Alexander Chao in Daniel
Ratner objavita fizikalni koncept.

2021

Eksperimentalni dokaz (Berlin, Nemčija)
- Objava v prestižni reviji Nature. Ekipa
Univerze Tsinghua s pomočjo naprave
Metrology Light Source v Nemčiji dokaže
delovanje.

Druga pot do svetlobe: Od teorije do preboja

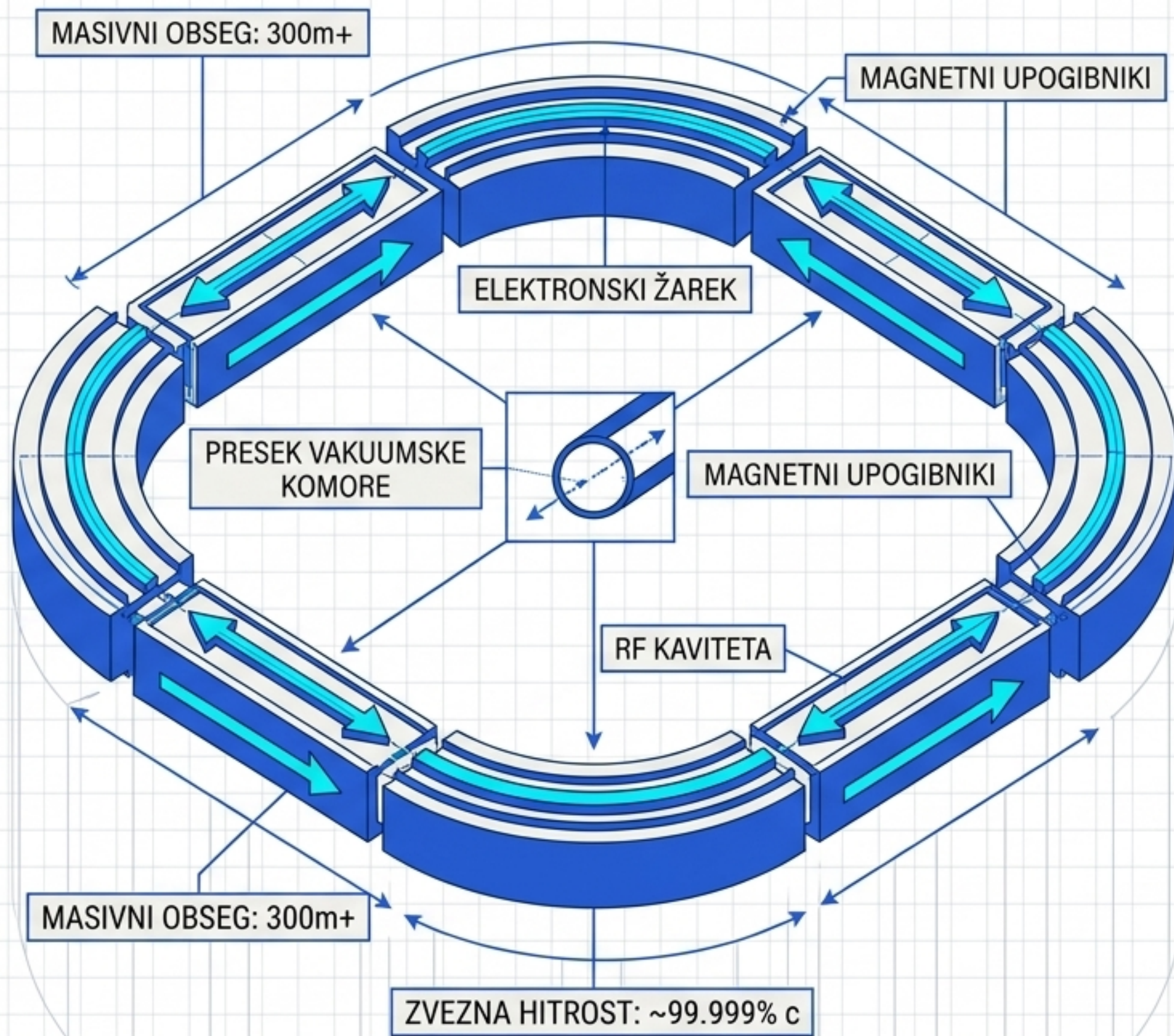
Znanstveni svet se je prebudil ob spoznanju, da za generiranje EUV svetlobe morda sploh ne potrebujemo kositra.

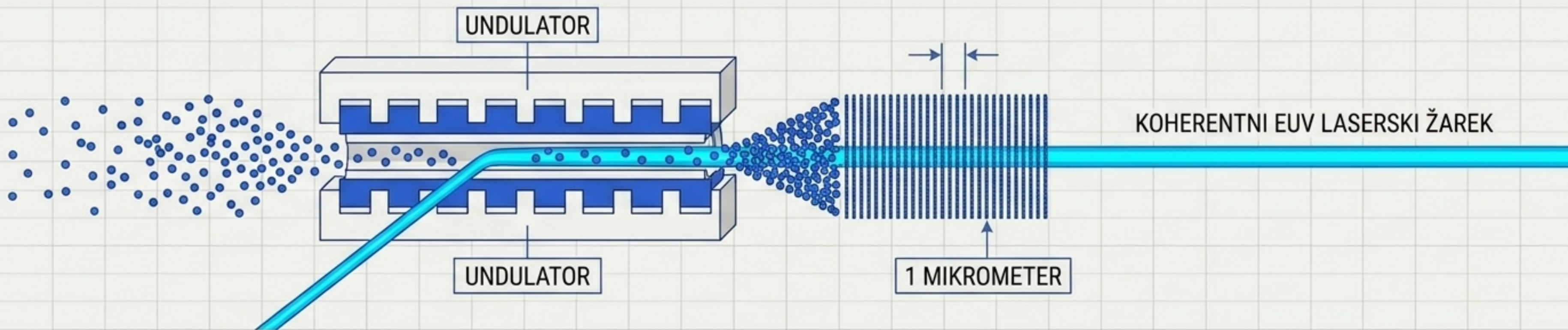
Stacionarno mikro-grupiranje (SSMB – Steady-State Micro-Bunching) v celoti opušča ASML-ov proces in se zanaša na povsem drugo vejo fizike. Ta dokaz koncepta je v najbolj varovanem tehnološkem sektorju na svetu prebil nepričakovano luknjo.

Nova paradigma: Shranjevalni obroč

Namesto ustvarjanja svetlobe z uničevanjem materiala (kositer), SSMB deluje na principu manipulacije prostih elektronov.

- **Arhitektura:** Pospeševalnik delcev, kjer žarek elektronov kroži po masivnem obroču z zvezno hitrostjo, ki je blizu svetlobne.
- **Problem standardnih obročev:** Običajno so elektroni v takih obročih razporejeni v ohlapnih gručah (dolgih približno 1 cm in razmaknjenih 60 cm). To oddaja navadno svetlobo, ki pa ni niti približno dovolj močna ali fokusirana za litografijo.





FIZIKA MIKRO-GRUPIRANJA (MICRO-BUNCHING)

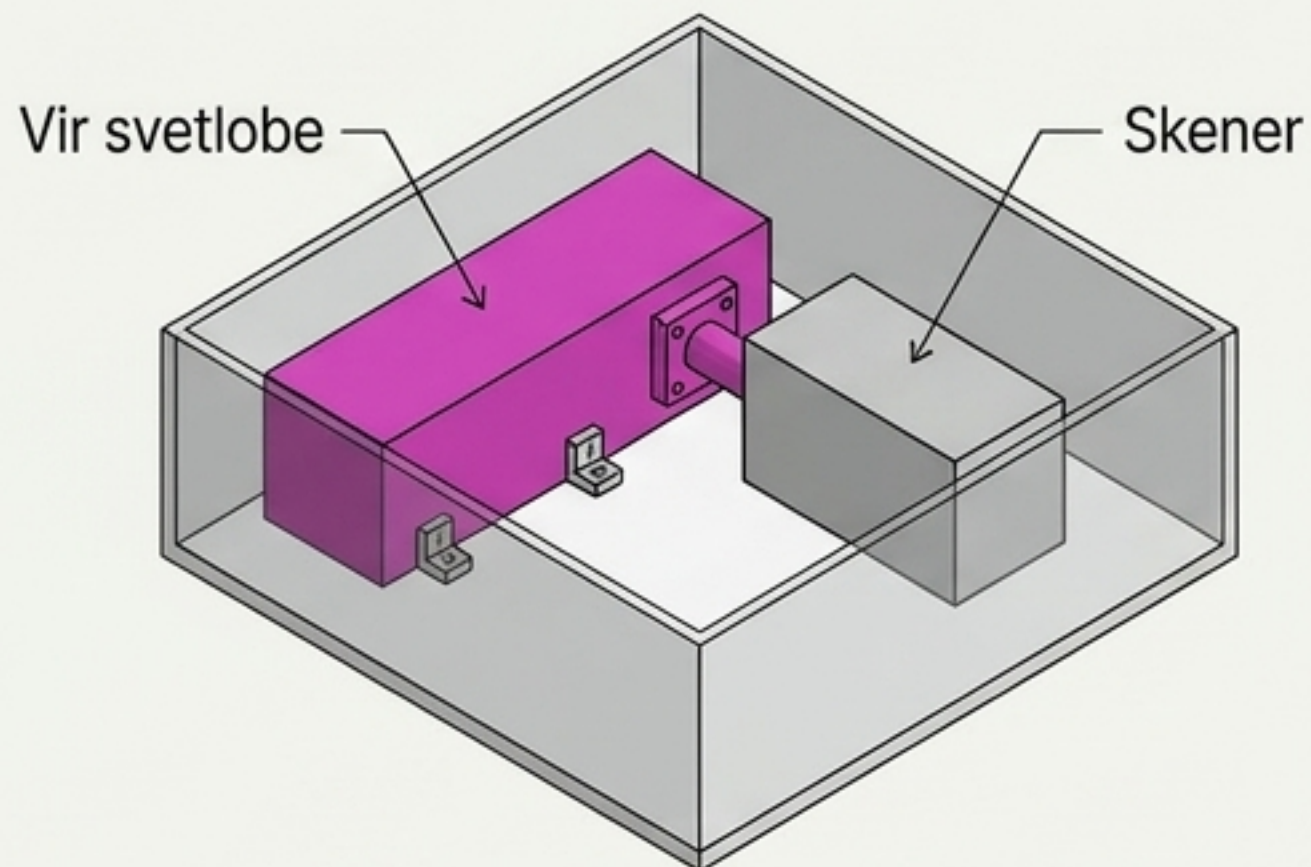
Skrivnost SSMB tehnologije je stiskanje elektronov v popoln red. Ko elektroni potujejo skozi skrbno nastavljeno magnetno polje (undulator) z obsevanjem prilagojenega laserja, se po enem obhodu zložijo v mikroskopske, enakomerno razporejene gruče.

LASERSKA FAZA

Vsaka gruča je dolga zgolj 1 mikrometer. Ko so elektroni stisnjeni tako tesno, prenehajo svetiti kot običajna žarnica. Njihovi svetlobni valovi se popolnoma poravnajo, obroč pa začne oddajati enakomeren, močan laserski žarek EUV svetlobe. Zvezno in brez prekinitev.

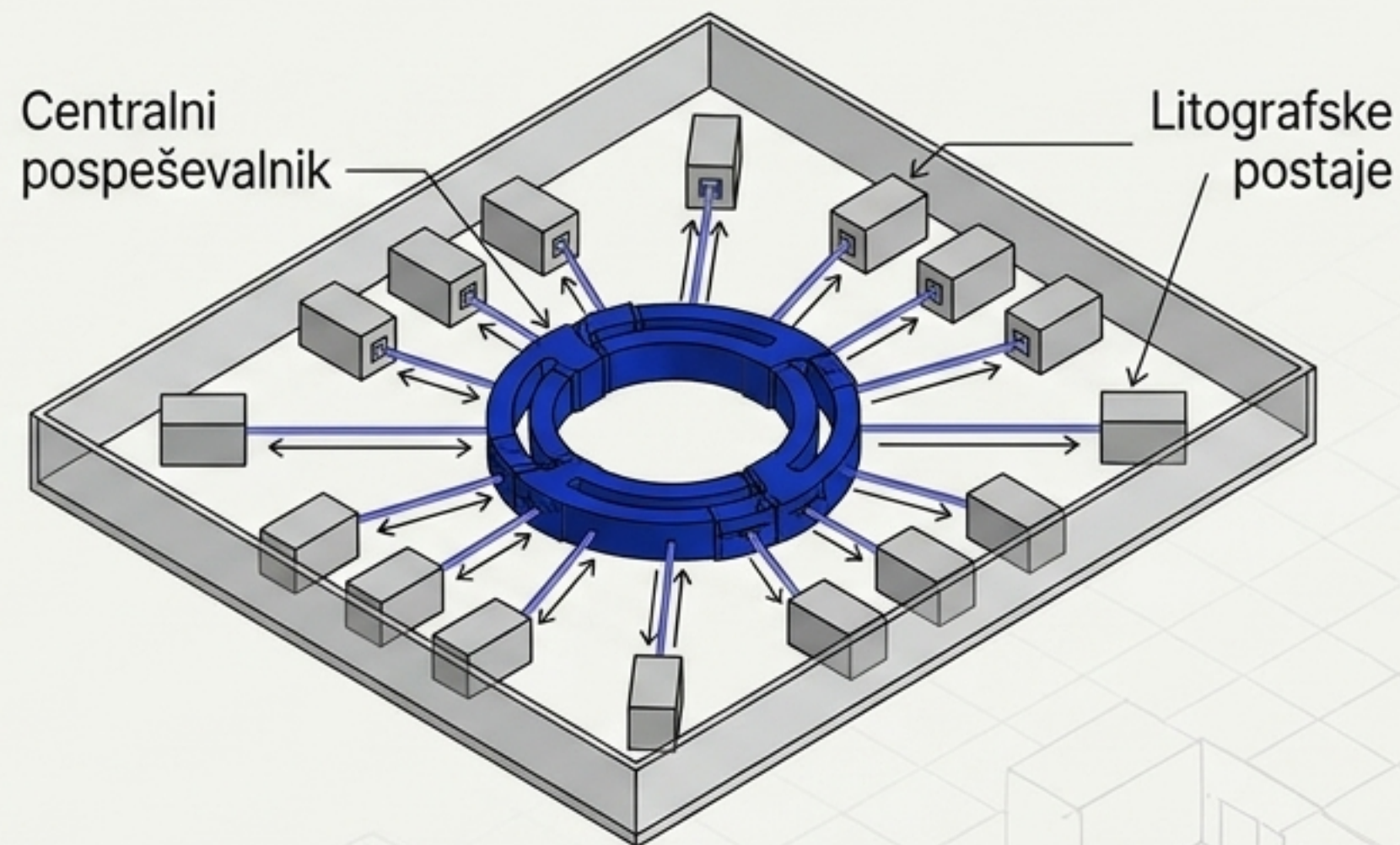
1 na 1 model

ASML model



Litografski top (Hub-and-Spoke)

SSMB model



Arhitekturni preskok: Litografski top

SSMB temeljito spreminja ekonomijo tovarn polprevodnikov. Namesto nakupa enega izjemno dragega, krhkega vira svetlobe za vsak posamezen tiskalni stroj, SSMB ponuja deljeno infrastrukturo. Natančen pospeševalnik (najtežji del) se zgradi le enkrat kot centralno vozlišče. Okoli njega se razporedijo cenejše, preprostejše litografske postaje. En vir svetlobe poganja celotno tovarno.

CLEANROOM TECHNICAL BRIEFING

	Trenutna paradigma: ASML LPP	Disruptor: SSMB Pospeševalnik
Mehanizem	Uparitev kositra z laserjem	Elektroni v magnetnem obroču
Tip žarka	Stroboskopski (50.000 pulzov/s)	Zvezen (koherenten laserski tok)
Ciljna moč EUV	Trenutno nekaj sto vatov (cilj 1000 W do 2030)	Kilovatni nivo moči po zasnovi
Stranski produkti	Kovinski ostanki, degradacija zrcal	Čist vakuum, brez ostankov materiala
Topologija	Ena naprava za en optični bralnik	Eno centralno vozlišče za celotno tovarno

CLEANROOM TECHNICAL BRIEFING

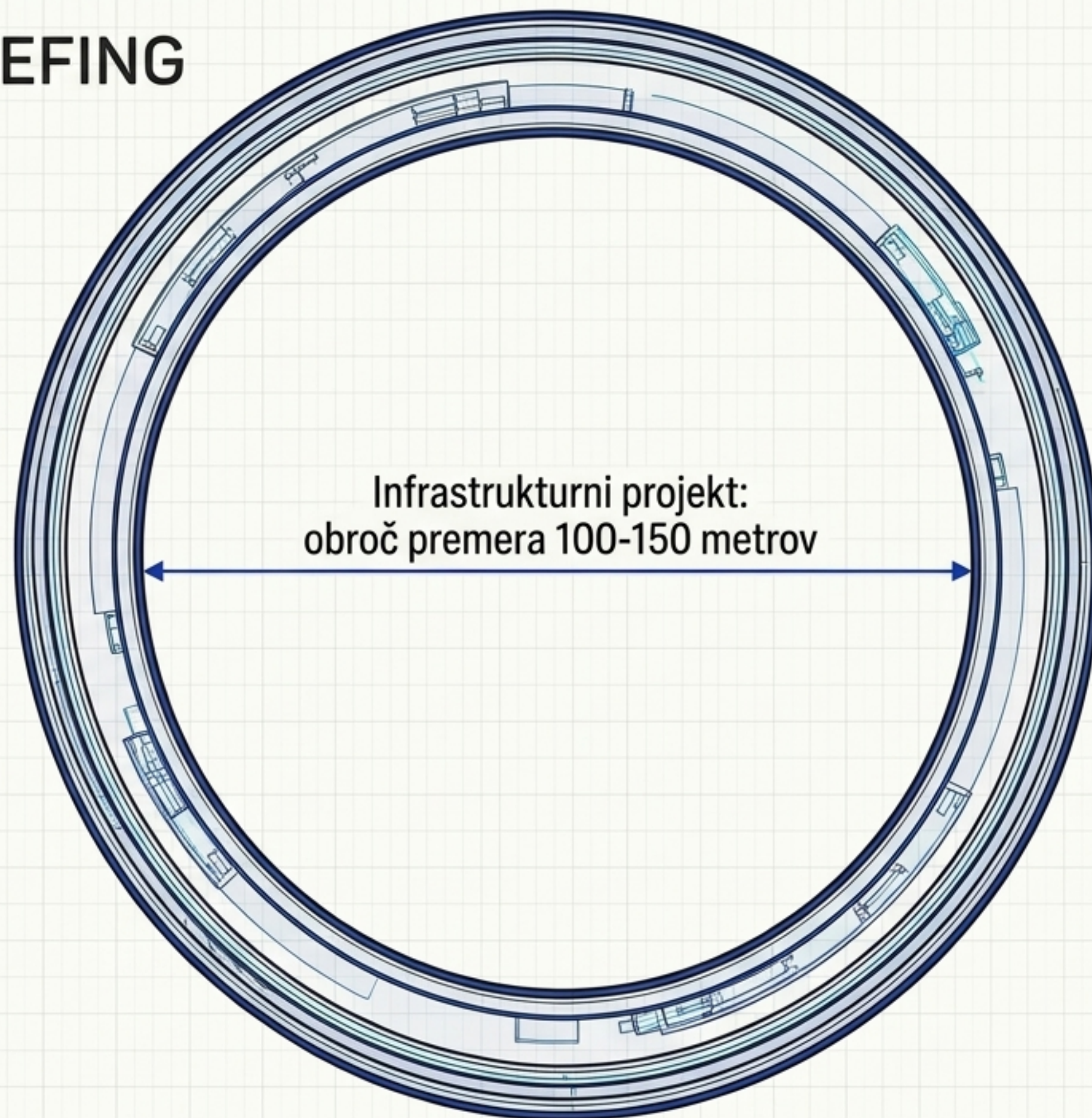


Surova realnost: Vrzel proizvodnega izkoristka

Laboratorijski poskus v Berlinu je dokazal zgolj fizikalni mehanizem z delčkom naboja, potrebnega za pravo proizvodnjo. Med ustvarjanjem svetlobe v laboratoriju in tiskanjem milijonov popolnih čipov brez napak zeva gromozanska prepada.

EUV žarek je le ena komponenta. Zrcala in kemični procesi fotorezistov zahtevajo desetletja učenja in napak v praksi, ki jih ni mogoče preskočiti, prenesti ali ukrasti. ASML ima 30-letno prednost pri odpravljanju teh mikroskopskih napak.

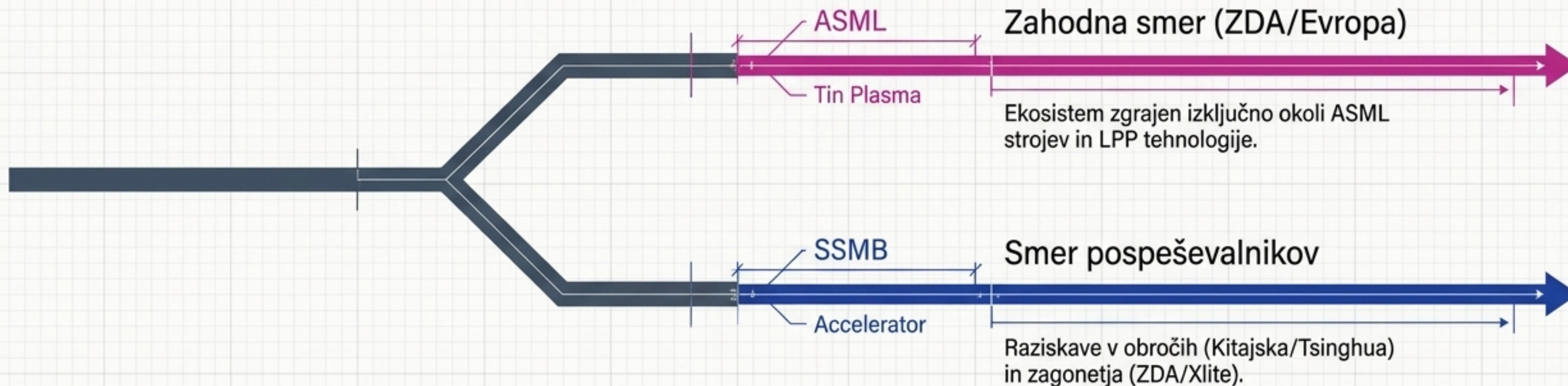
CLEANROOM TECHNICAL BRIEFING



Infrastrukturna ovira

SSMB ni izdelek s tekočega traku, temveč ogromen infrastrukturni projekt. Gradnja stabilnega litografskega topa kilovatnega razreda, ki bo brezhibno deloval 24 ur na dan, zahteva izgradnjo namenskih raziskovalnih in industrijskih kompleksov velikosti celotnih tovarn. Fizika ima še vedno odprta vprašanja, sistem pa bi lahko trčil ob omejitve pri skaliranju, ki jih še nihče ni odkril.

CLEANROOM TECHNICAL BRIEFING



Geopolitična sinteza: Konec samo ene poti

Vzvod monopolov in izvoznih omejitev temelji na absolutni ekskluzivnosti. Celotna ameriška in evropska strategija nadzora je predvidevala, da obstajajo samo ena vrata do naprednih čipov (ASML).

Z resnimi vlaganji v tehnologijo pospeševalnikov, sama možnost alternativne fizikalne poti ruši to paradigmo.

Tudi če bo trajalo desetletje, je eksperiment SSMB dokazal najpomembnejše: monopol ni bil nikoli trajen. Zanašal se je le na a eno samo ozko grlo. In ozko grlo velja le tako dolgo, dokler nekdo ne prebije nove poti skozi zid.