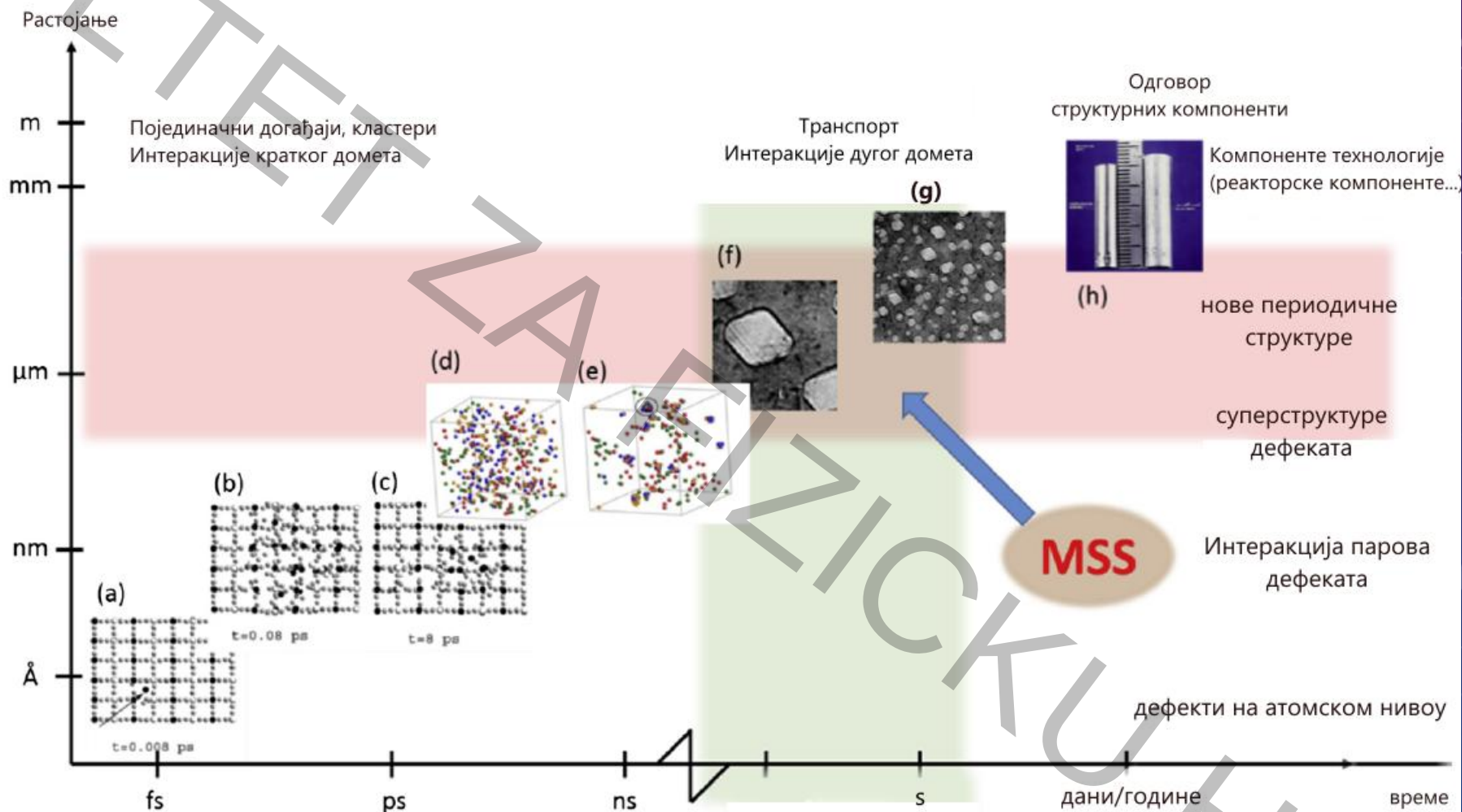


РАДИЈАЦИОНА ХЕМИЈА И
ФИЗИКА МЕТАЛА

ЗНАЧАЈ ПРОУЧАВАЊА РХФ МЕТАЛА И ПОЛУПРОВОДНИКА

- Јонизује зрачење са металима реагује преко померања атома (јона) и екситација електрона.
- Последице дужег изгања су микроструктурне и макроскопске промене.
- Познавање и моделирање ових ефекат су есенцијални за функционисање нуклеарних и фузионих реактора, стабилност материјала у свемирској технологији и акцелератора који дају високу енергију честица.
- Материјали који се користе у овим технологијама, као што су специјалне врсте челика, легуре цирконијума и суперлегуре морају бити отпорне на дејство високоенергетског зрачења.
- Полупроводнички елементи који се користе у нуклеарним постројењима, детекторима и свемирским инсталацијама морају испуњавати исте стандарде.

ВРЕМЕНСКА СКАЛА И ДИМЕНЗИЈЕ ДОГАЂАЈА



КАРАКТЕРИСТИКЕ ИНТЕРАКЦИЈЕ Ј.З. СА МЕТАЛИМА

- Јонизација коју изазивају гама зрачење и електрони бива лако неутралисана од стране електронског облака, производећи само пролазне промене у проводљивости.
- Брзи неутрони, протони и тешке наелектрисане честице у сударима преносе довољно енергије да избаце атоме (јоне) са њихове позиције у кристалној решетки, стварајући ваканције и парове ваканција и атома дислоцираних у интерстицијалне позиције (Френкелови парови) и кластере дефеката који опстају дуго после завршетка озрачивања.
- Након примарних аката следи каскада догађаја која се на крају може манифестовати у нарушавању структуре и последичног губитка структуре материјала.

ОСНОВИ ТЕОРИЈЕ РАДИЈАЦИОНО ИНДУКОВАНОГ ПОМЕРАЈА АТОМА

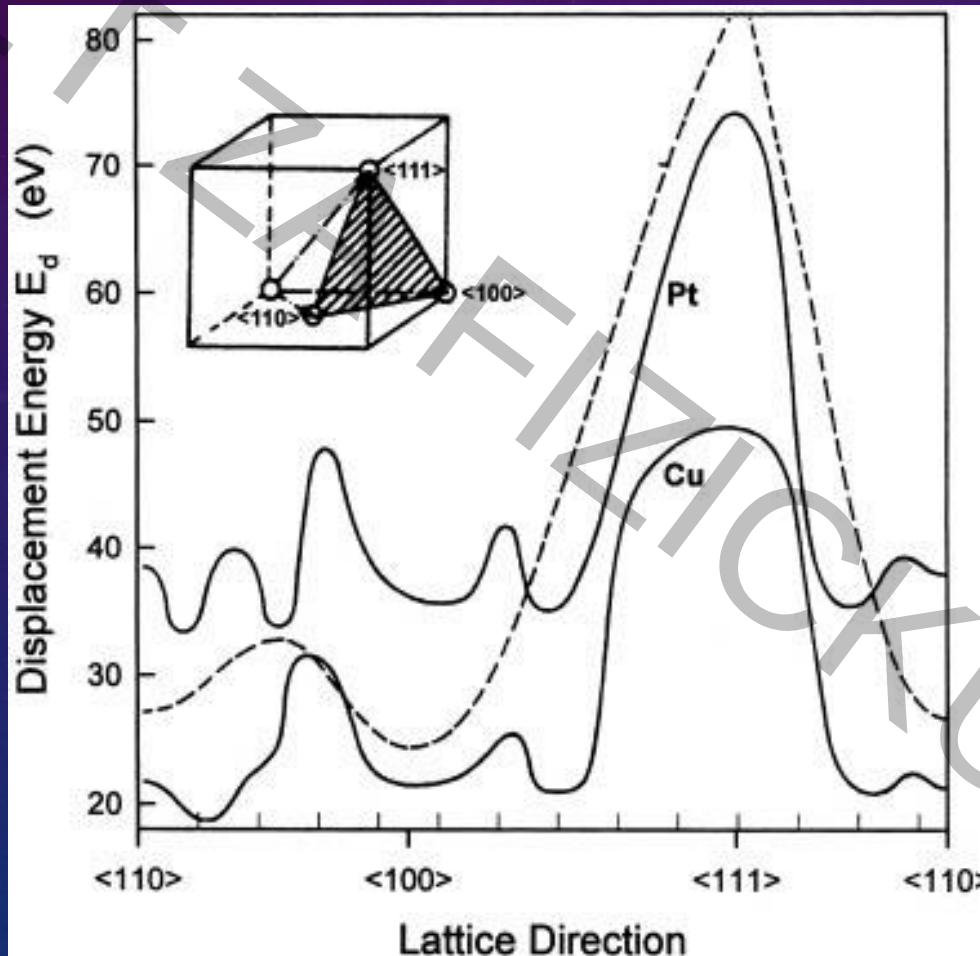
- Енергија неопходна да се атом у к.р. дислоцира из иницијалне позиције (енергија прага) E_d је типично између 20-40 eV за већину метала (25 eV за Fe, 40 eV за Cu), представља минималну енергију за формирање Френкеловог пара.
- Према теорији судара максимална енергија коју електрони могу предати атому је

$$T_{max} = \frac{2E(E + 2m_e c^2)}{M c^2}$$

док је за неутроне и тешке јоне

$$T_{max} = \frac{4EM_1M_2}{(M_1 + M_2)^2}$$

- Енергије дислокације зависи и од оријентације кристалних равни у односу на сноп честица — најниже су за главне равни кристала.



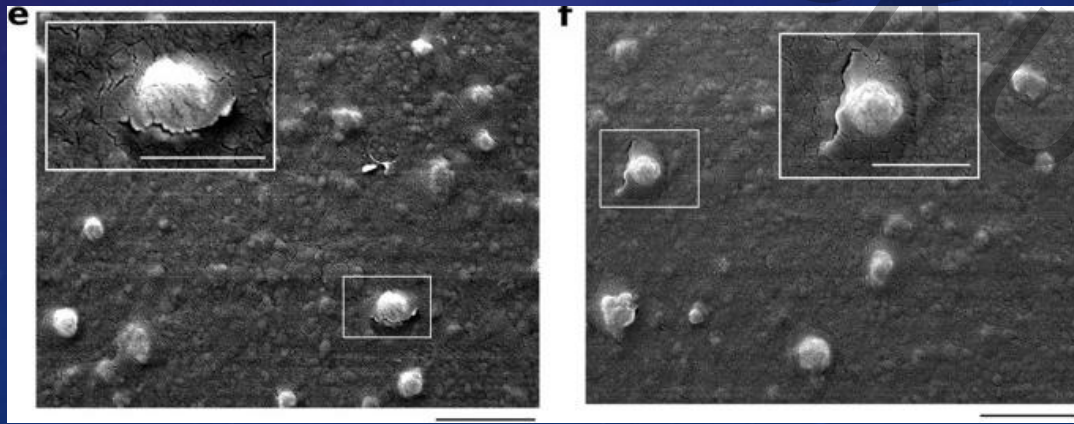
- Померај по атому (решетке) је мера р.и. оштећења у металу

$$dpa = \int \phi(E) \sigma_d(E) N \frac{\epsilon(E)}{2E_d} dT$$

$\phi(E)$ је флукс честица енергије E , док је $\sigma_d(E)$ ефикасни пресек за дислокацију атома. $\epsilon(E)$ је енергија оштећења, која је према Kinchin-Pease моделу једнака $2.5E \frac{E_d}{T_m}$, где је T_m температура топљења метала.

- Уколико је енергија $\epsilon(E)$ између E_d 2,5 и E_d настајаће само Френkelови парови. Ако је већа, примарно дислоцирани атом има довољно енергије да покрене каскаду догађаја – нове, сложене и просторне дислокације и агрегације.

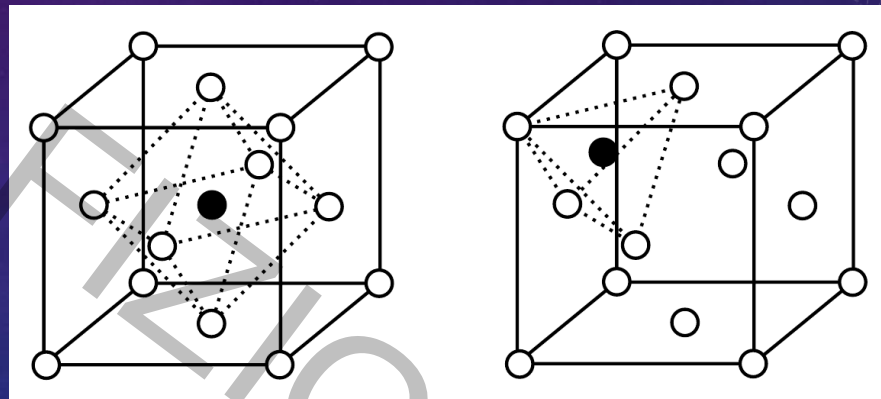
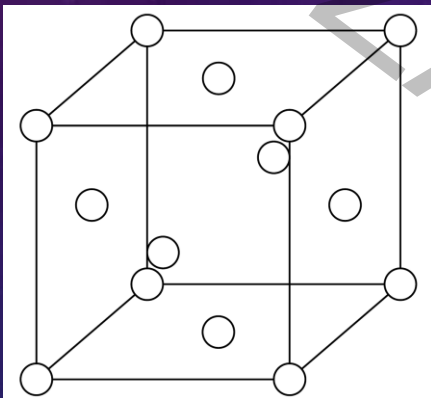
- Радијационо генерисани дефекти интерагују са постојећим дислокацијама атома, границама где долази до промене оријентације/облика кристалне структуре и преципитатима преко радијационо појачане дифузије и сегрегације у легури.
- Акумулиране дислокације редукују отпорност материјала на стрес, смањује могућност деформације као одговора на стрес, као и отпорност на фрактуру (због радијациог очвршћавања и кртости)
- У деформационим кластерима долази до накупљања гаса (посебно ако се материјал бомбардује јонима гасова (нпр. водоник, кисеоник ...) што се може манифестовати појавом деформација и гасних џепова („пликова“) на површини метала.



„пликови“ на
површини W
индуковани
Бомбардовањем
са Н

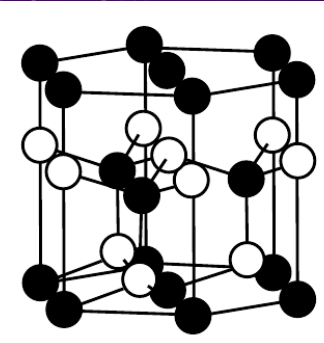
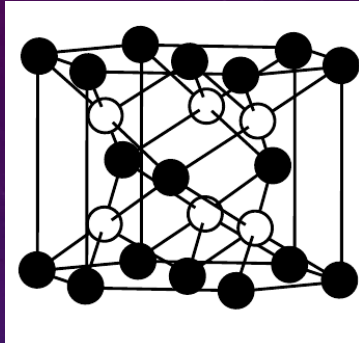
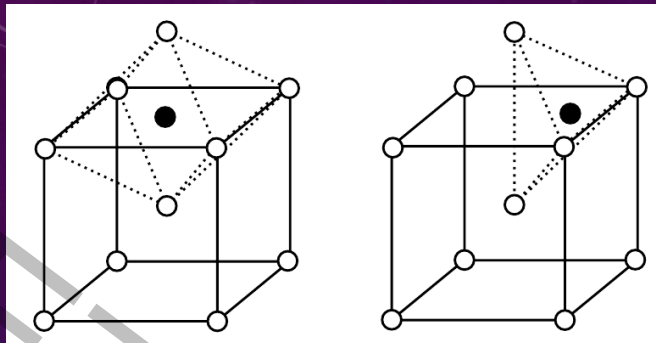
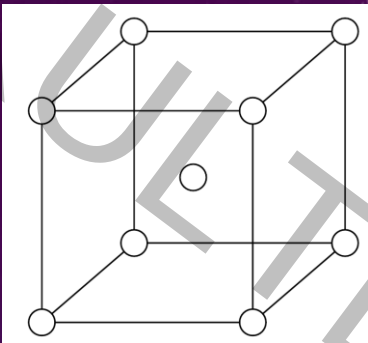
ВРСТЕ ДЕФЕКТА

- Метали поседују кристалну структуру и парови ваканција и атоми дислоцирани на позиције између чворова решетке уносе у њу неправилности, од тачкастих, па све до тродимензионалних

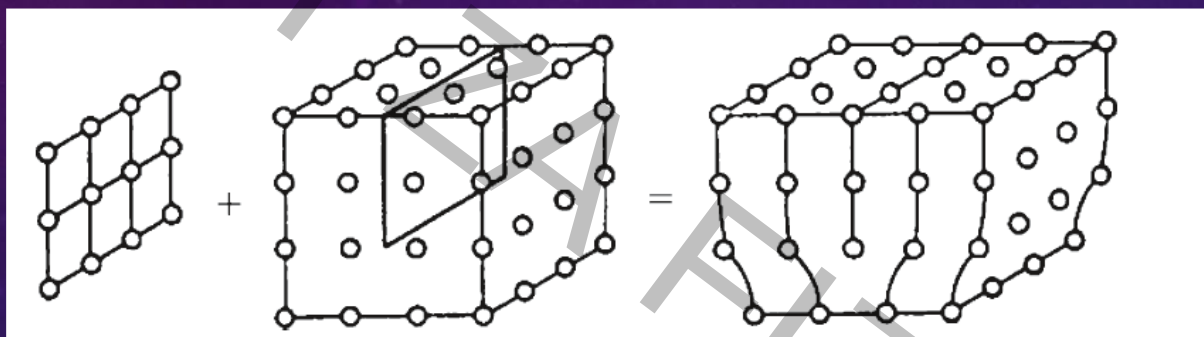


FCC

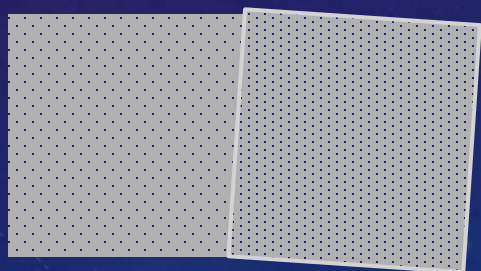
Дефекти у центру хексаедра или тетраедра које формирају атоми у центрима страна кубичног кристала



BCC

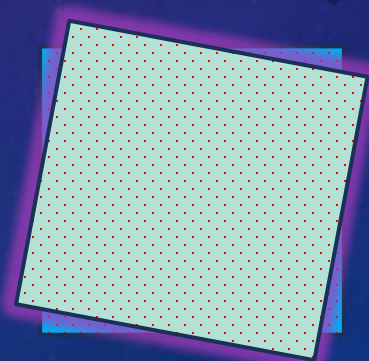


Деформација равни (1D дислокација)



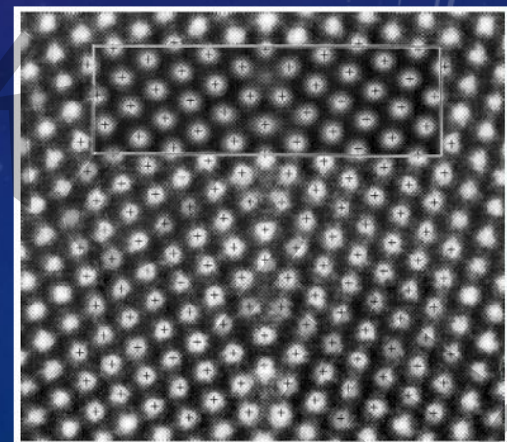
нагињање

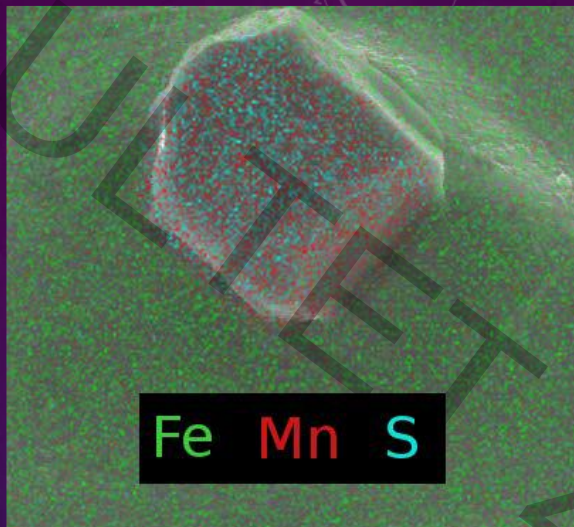
2D



увијање

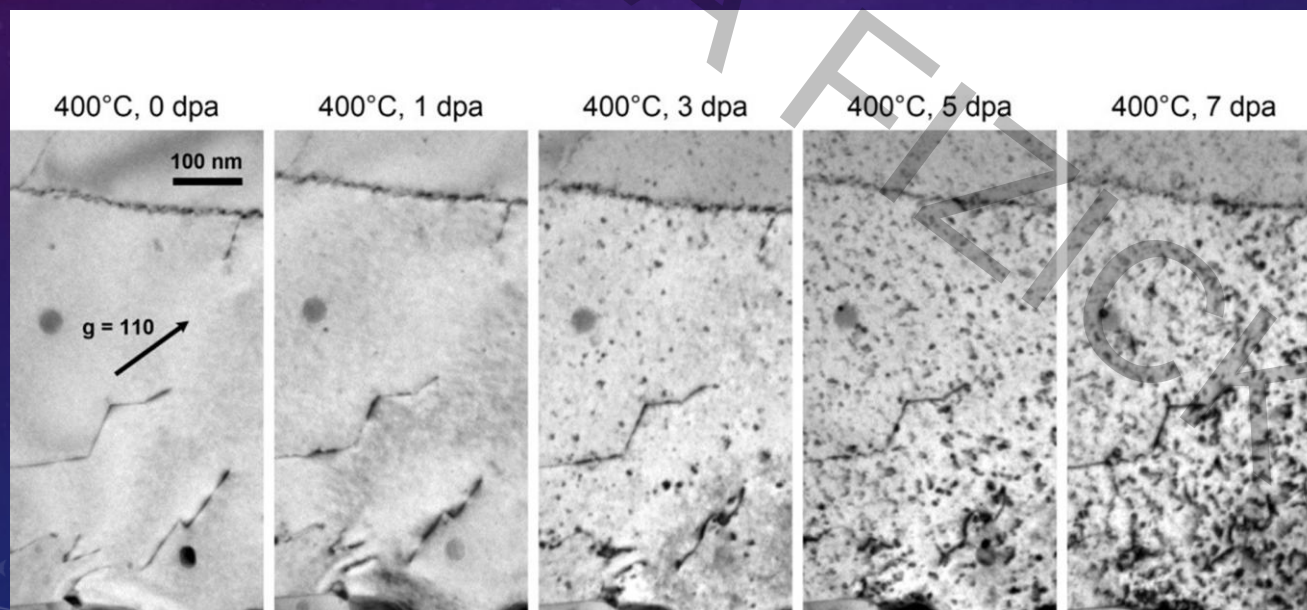
Al - AFM





3D дефект – Идвајање фазе унутар материјала:
Појединачни кристал MnS у нерђајућем челику
(SEM са елементном анализом)

Пример: Преципитат секундарних честица у Zircalloy 2



DPA = померај по
атому кристалне решетке

КОЛИЗИОНЕ КАСКАДЕ

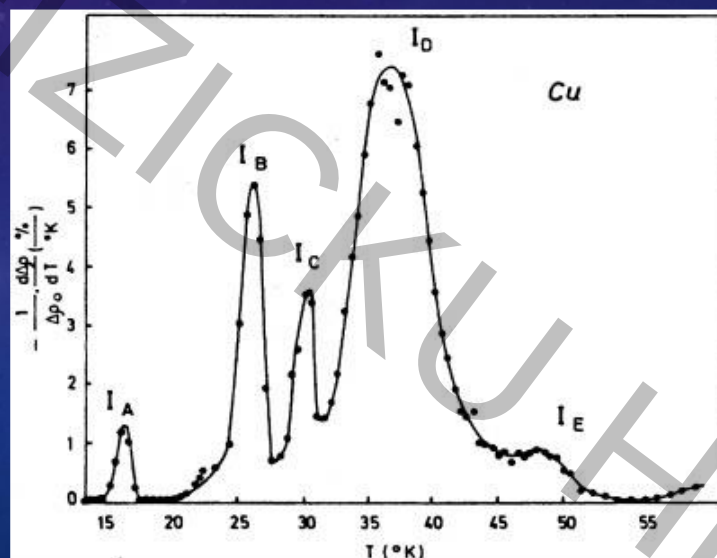
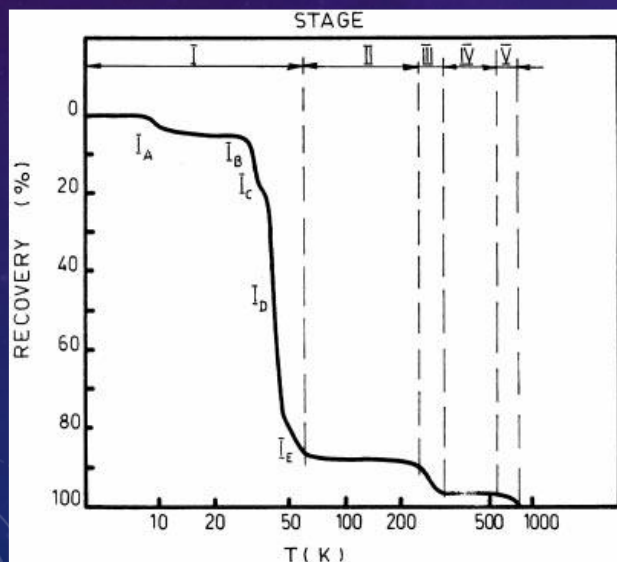
- У случају када је енергија бомбардујућих честица велика примарно дислоцирани атом може имати довољну енергију да дислоцира један или више атома, највероватније у низу атома који се налазе у главним кристалним равнима.
- У случају густо пакованих низова атома, ваканција може настати и на позицији удаљеној од места примарне интеракције.
- На месту иницијације прве фазе каскаде настаје деплециона зона.
- Релативно велика фракција енергије коју примарно дислоцирани атом оставља у зони каскаде до локалног загревања што покреће другу фазу каскаде; то се назива „термалним пиком“.

- Да ли ће доћи до значајног реструктурирања деплеционе зоне зависи од времена њеног „живота“, која опет зависи од температуре решетке и димензија каскаде.
- За мале величине каскада ($<20 \text{ \AA}$) време живота је око 10^{-12} s (брза релаксација) и оне доводе до загревања кристала без значајних модификација његове структуре.
- За веће каскаде ($50\text{-}100 \text{ \AA}$) релаксација је значајно спорија) и на местима дефекта долази до рекристализације и реконфигурације дефекта.
- Пошто код оваквих каскада постоји значајан температурски градијент ваканције мигрирају у језгро дефекта формирајући кластере ваканција или веће празнине.
- Финални ступањ каскаде је релаксација и она траје све до 10^{-7} s . Током ње дефекти који су мобилни на собној температури мигрирају ван зоне каскаде, док појединачни интерстицијални атоми улазе у процес рекомбинације или су формирали кластере.

РАДИЈАЦИОНО ОШТЕЋЕЊЕ МЕТАЛА ПОД ДЕЈСТВОМ ЕЛЕКТРОНА И ЕЛЕКТРОНСКИХ СНОПОВА

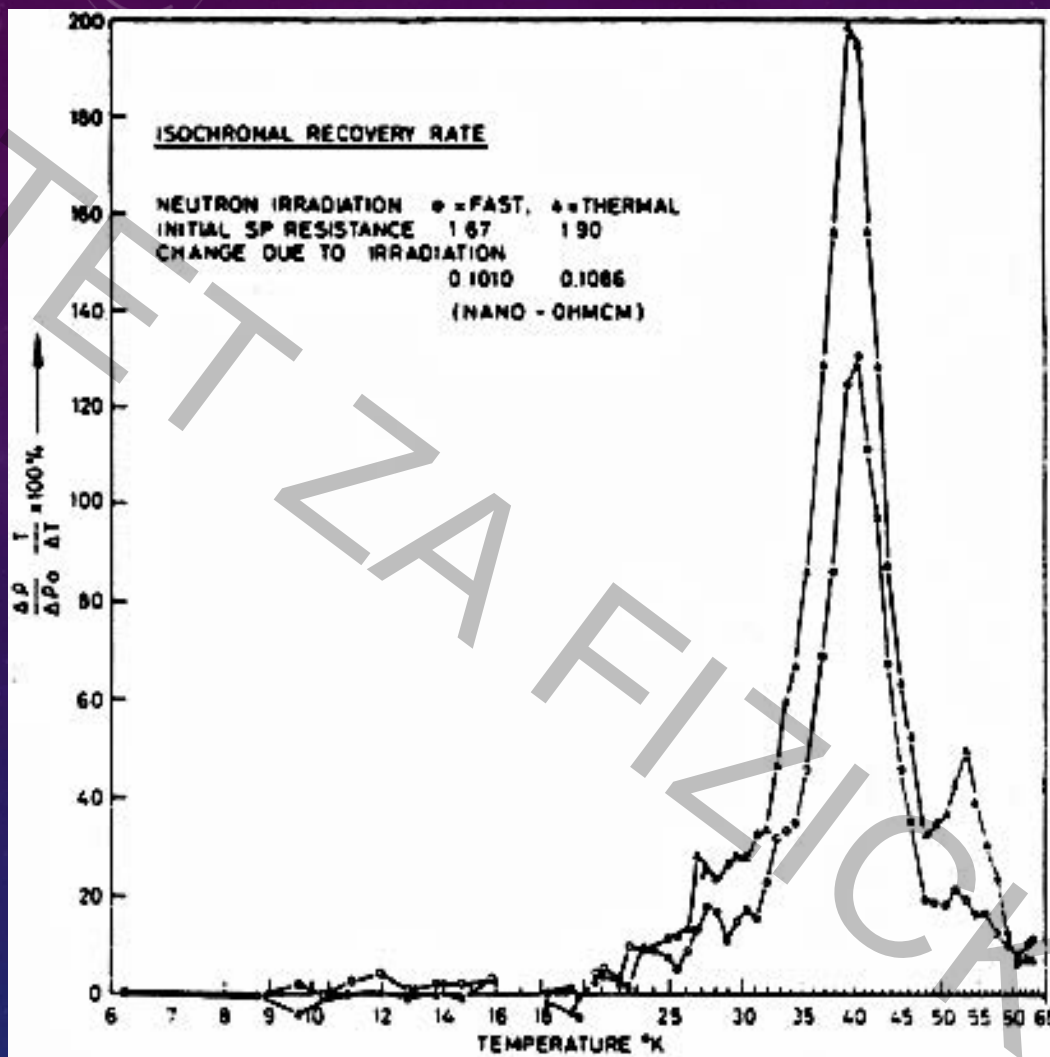
- Ефекти који брзи електрони генеришу у металима се своди на формирање Френкелових парова.
- Густина дефеката се процењује преко мерења проводљивости, док се тип дефеката и еволуција финалних оштећења одређује преко кривих одгревања.
- Криве одгревања обично имају пет ступњева.

Cu



РАДИЈАЦИОНО ОШТЕЋЕЊЕ МЕТАЛА ПОД ДЕЈСТВОМ НЕУТРОНА

- Радијационо оштећење под дејством неутрона може бити последица захвата спорих неутрона (нуклеарна реакција) или процеса расејања брзих неутрона.
- Захват неутрона може довести до формирања β^- емитера или процеса фисије. Последњи процес уноси нечистоће у кристал.
- Обим оштећења варира од изолованих Френкелових парова, до каскадних оштећења великих димензија.
- Неутрони емитовани у процесу фисије имају распон енергија 0-14 MeV, са највероватнијом вредношћу од око 1 MeV и могу да доведу до релативно великих каскада помераја.
- Ово зависи од редног броја метала/легури: за лаке материјале доминирају велике, релативно удаљене каскаде, док су оне код материјала великог Z мале и јако концентрисане.
- У последњем случају већина Френкелових парова подлеже рекомбинацији.



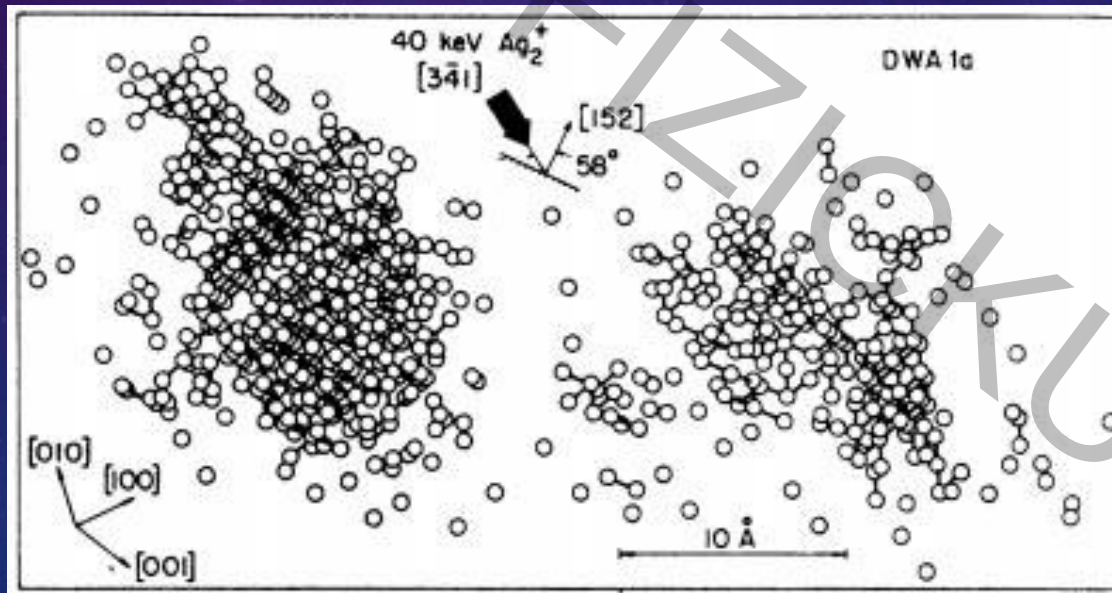
Крива одгревања за дефекте у металу изазване неутронима

РАДИЈАЦИОНО ОШТЕЋЕЊЕ МЕТАЛА ПОД ДЕЈСТВОМ ЛАКИХ ЈОНА

- Излагање метала високоенергетски протонима, деутеронима и алфа честице предаје атомима метала сличне енергије као и неутрони.
- Међутим због малих ефикасних пресека за расејање доминантни су нискоенергетски трансфери
- Стога у металима доминира производња малог броја Френкелових парова
- Уколико у материјалу егзистирају тачкасти дефекти број парова значајно расте.
- Водоник може бити заробљен на местима где су присутни атоми нечистоћа.

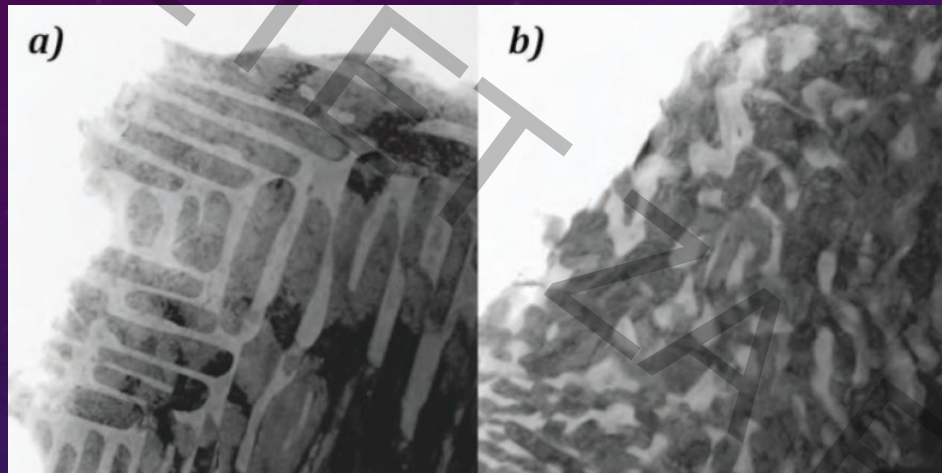
РАДИЈАЦИОНО ОШТЕЋЕЊЕ МЕТАЛА ПОД ДЕЈСТВОМ ТЕШКИХ ЈОНА СРЕДЊИХ ЕНЕРГИЈА

- Бомбардовање метала тешким јонима оштећења углавном изазива подсредством колизионих каскада, где су ваканције сконцентрисане у језгру које је окружено интерстицијалним атомима.
- Каскаде формиране близу површине метала могу довести до формирања кратера.

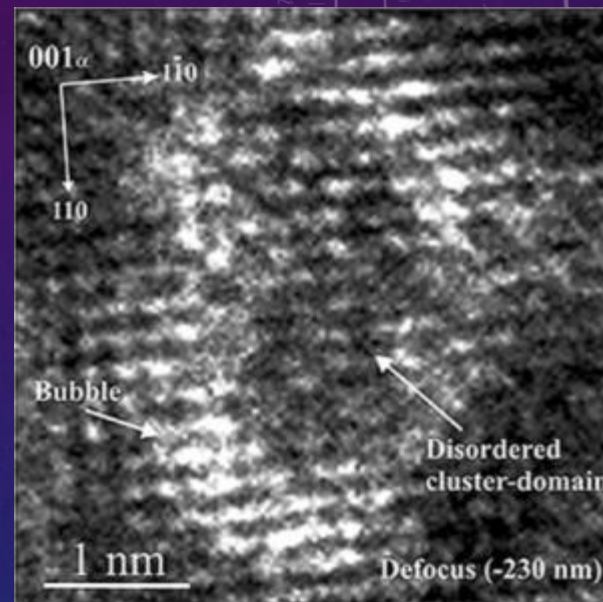


Деплеционе зоне
 Ag^{2+} мета фолфрам.

РАДИЈАЦИОНО ОШТЕЋЕЊЕ МЕТАЛА ПОД ДЕЈСТВОМ ТЕШКИХ ЈОНА



Уранијум-золибден легура
Пре и после бомбардовања
тешким јонима 150 dpa (TEM)



Формирање мехурића He у
Нерђајућем челику излаганом снопу
He²⁺ јона