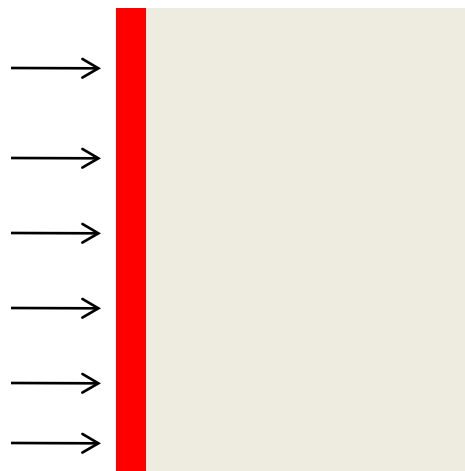
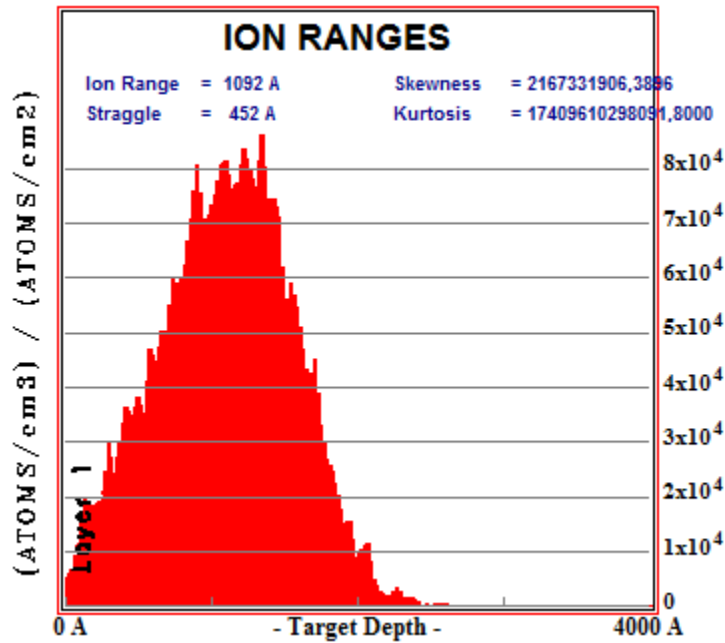


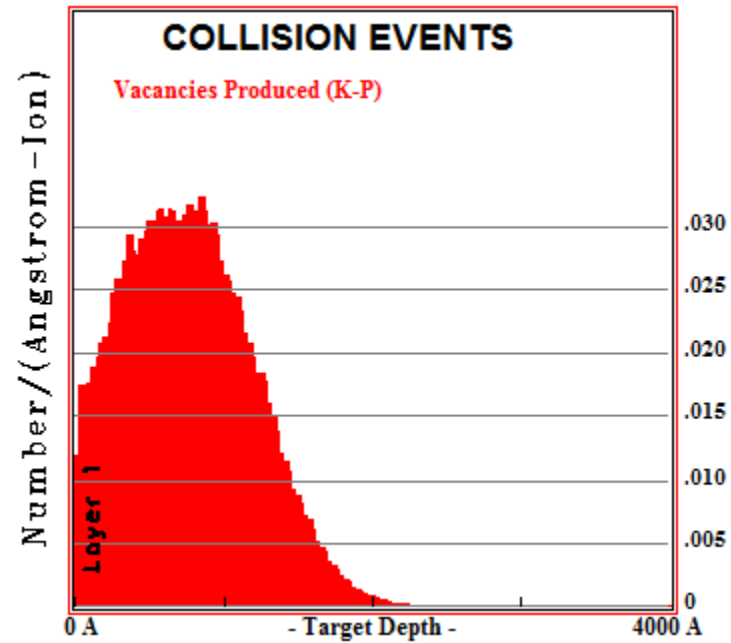
ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ РОЗПОДІЛУ КОНЦЕНТРАЦІЇ ІМПЛАНТОВАНИХ В КРИСТАЛ АТОМІВ ЗА МЕЖЕЮ ПРОБІГУ

В.Й.Сугаков





Пробіг

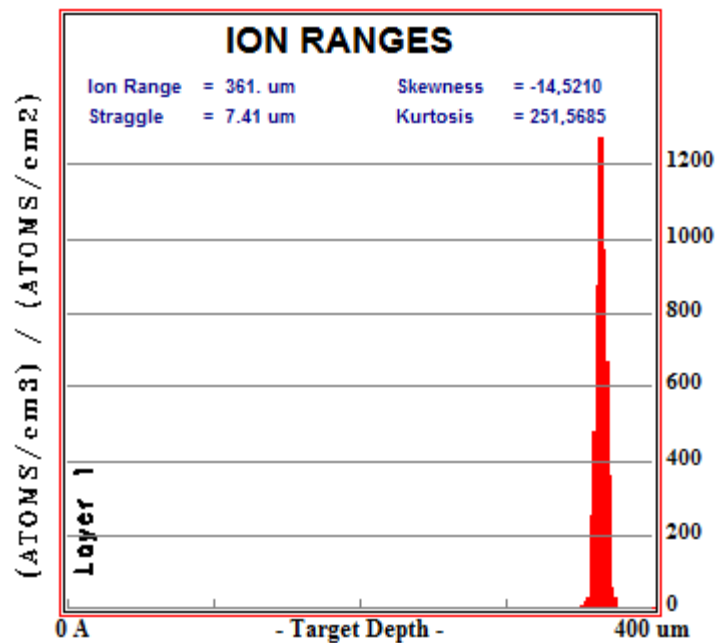


Дефекти

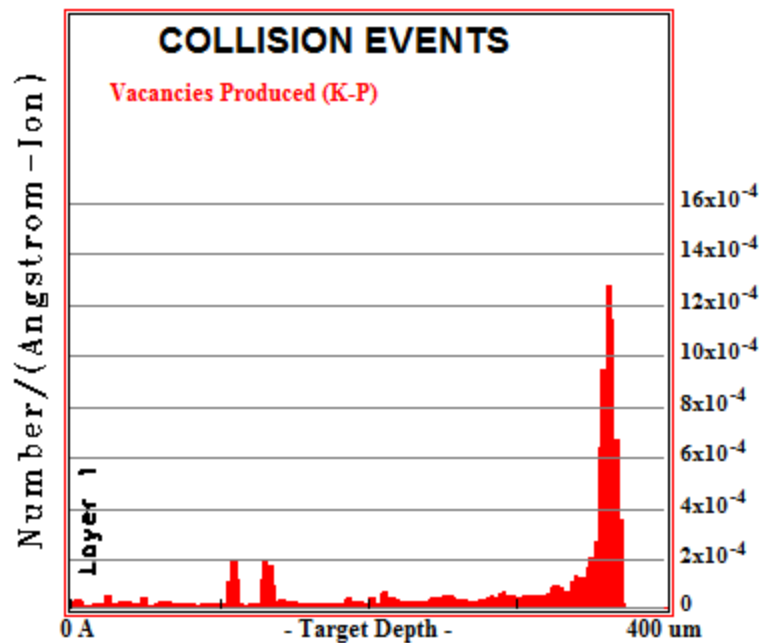
He in Si, 10 keV

$E \square (10 \div 100) keV$

$l \square (0.01 \div 0.1) \mu m$



Пробіг

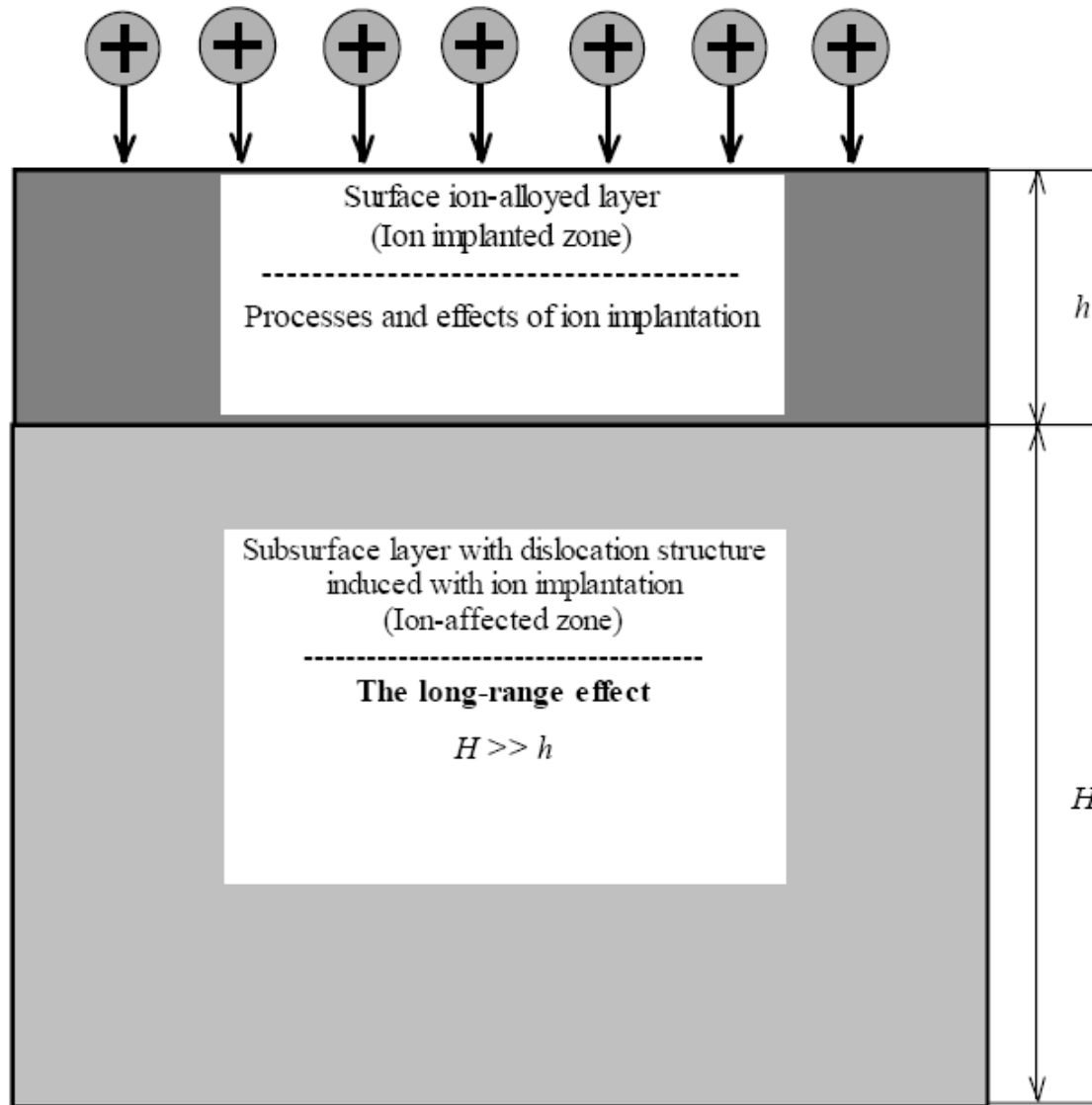


Дефекти

He in Si, 27 MeV

Long-range effects

Accelerated ion flux



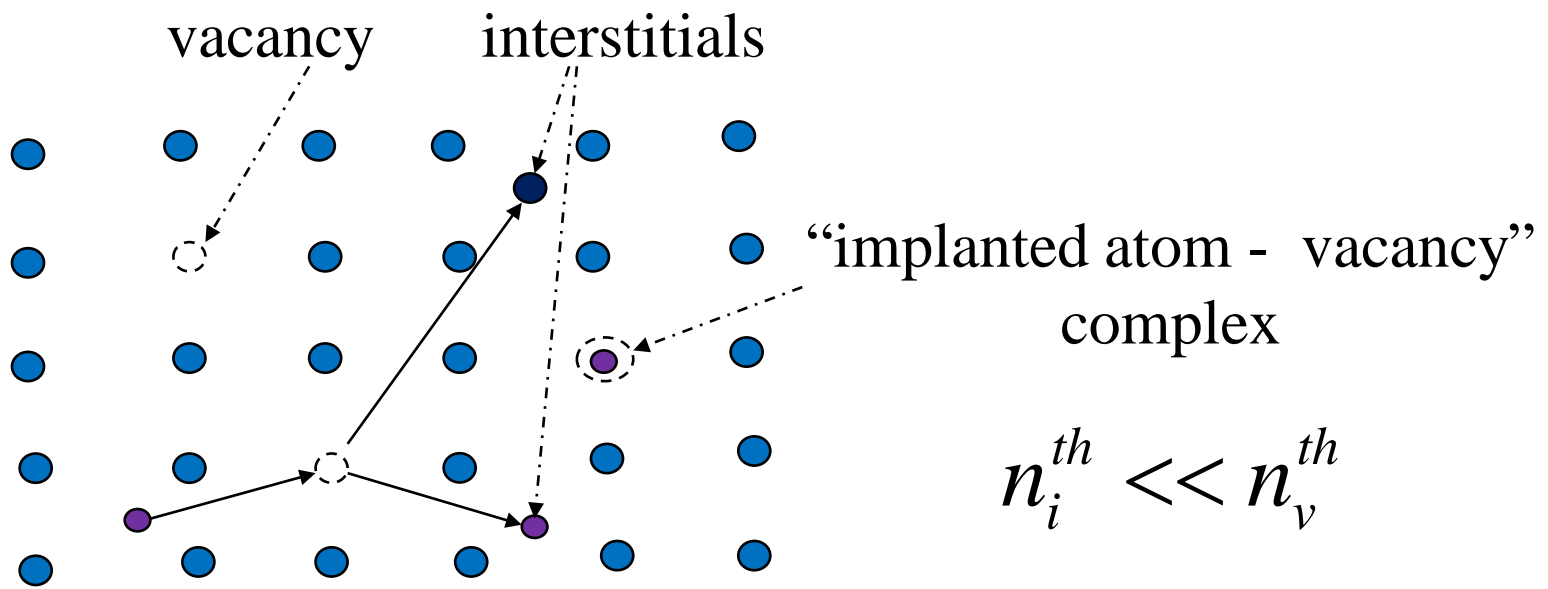
The long-range effect in metal materials at ion implantation

На великих відстанях від поверхні спостерігаються:

- 1) зростання мікротвердості,
- 2) формування дислокаційної структури, пор,
- 3) утворення нових фаз,
- 4) зміна параметрів кристалічної ґратки,
- 5) поява додаткового дефектного шару

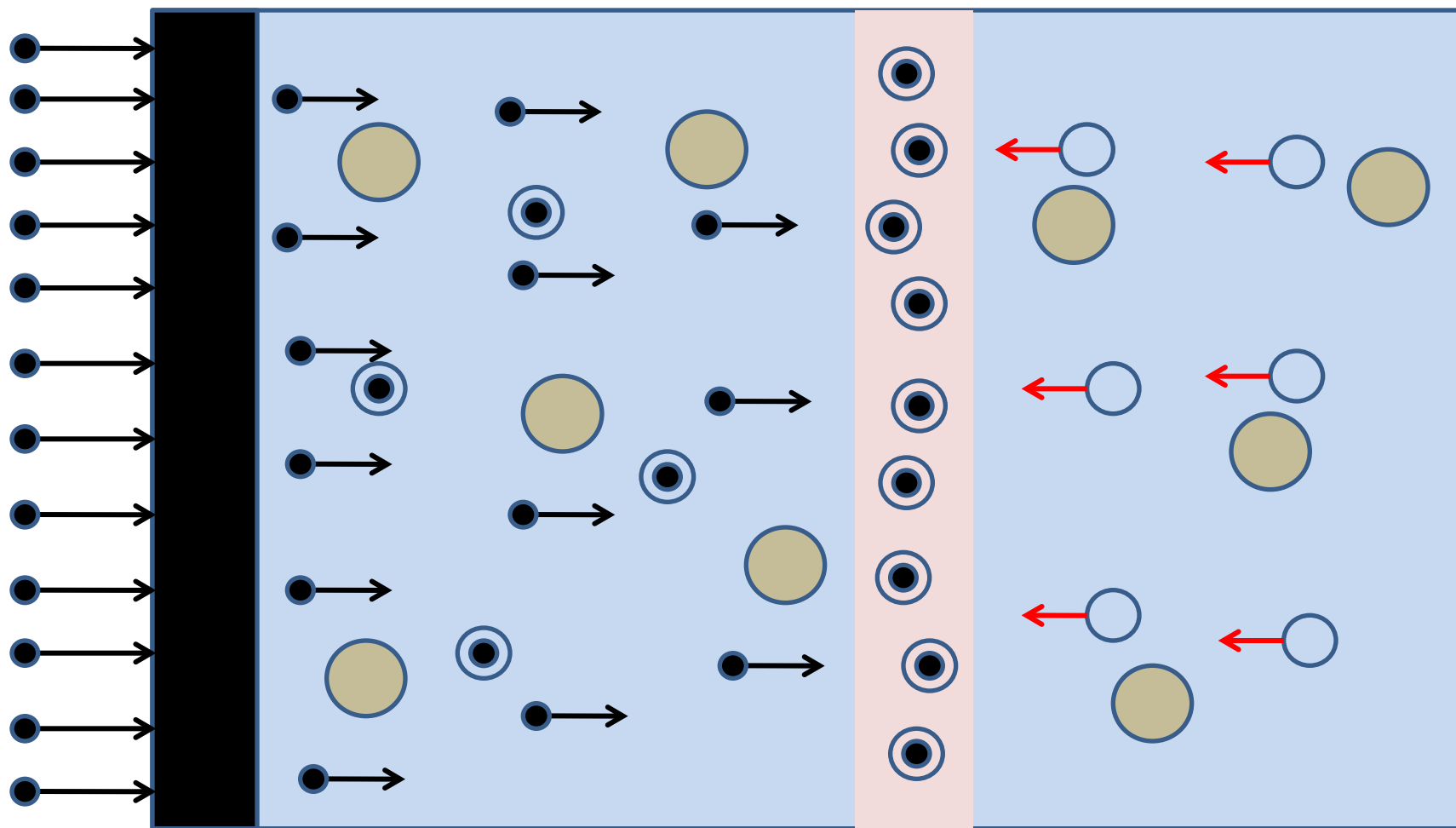
Моделі, що пропонуються для пояснення:

радіаційно стимульована дифузія, дифузія в полі деформацій, створених опроміненням, дифузія під дією звукових хвиль, вплив ударних хвиль, утворених каскадами, переміщення дислокацій в полі деформацій, утворення солітонів в мультифазних середовищах



Модель враховує наступні фактори:

1. Повне число атомів у міжвузловому положенні (імплантованих і створених опроміненням) перевищує число вакансій, створених опроміненням.
2. Існують нерухомі комплекси “імплантований атом-вакансія.
3. У формуванні області поза пробігом іонів важливу роль відіграють теплові вакансії.



← ——— L_F ——— →

● -implanted atom, ○ -vacancy, ⊙ -complex, ● - sink

$$\frac{\partial n_v}{\partial t} = K_v(z) + D_v \frac{\partial^2 n_v}{\partial z^2} - W_{vi} n_i n_v - W_{vp} (n_p n_v - v_{pv}^k n_k) - W_{vd} (n_v - n_v^{th})$$

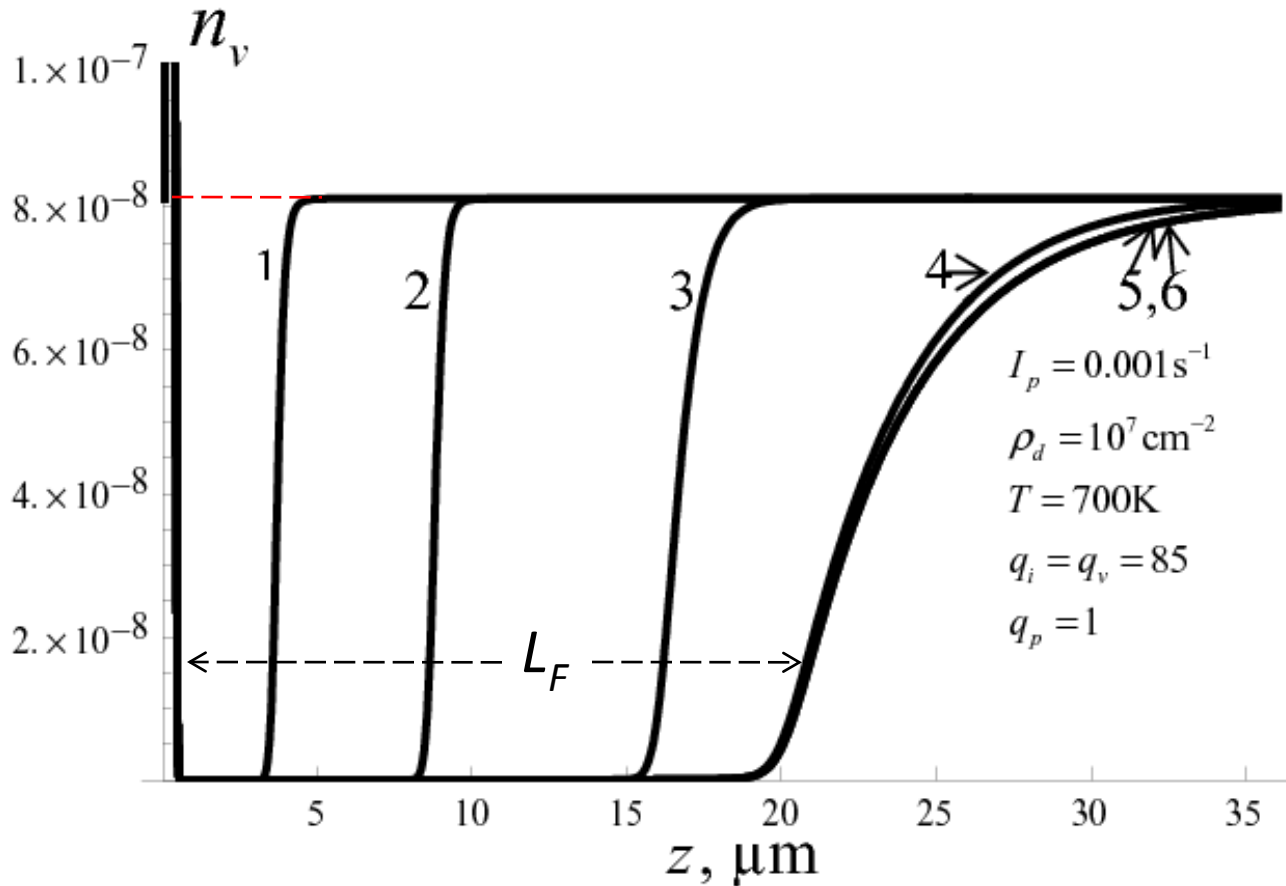
$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = K_i(z) + D_i \frac{\partial^2 n_i}{\partial z^2} - W_{vi} n_i n_v - W_{id} n_i$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = K_p(z) + D_p \frac{\partial^2 n_p}{\partial z^2} - W_{vp} (n_p n_v - v_{pv}^k n_k) - W_{pd} n_p$$

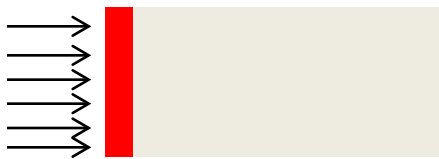
$$\frac{\partial n_k}{\partial t} = W_{vp} (n_p n_v - v_{pv}^k n_k)$$

$$K_o(z) = I_p \left(\frac{1}{2\pi} \right)^{1/2} \frac{1}{l} \exp \left(-\frac{(z - z_p)^2}{2l^2} \right) \quad K_{i(v)}(z) = q_{i(v)} K_p(z)$$

Розподіл вакансій у просторі для різних моментів часу (різних доз опромінення)

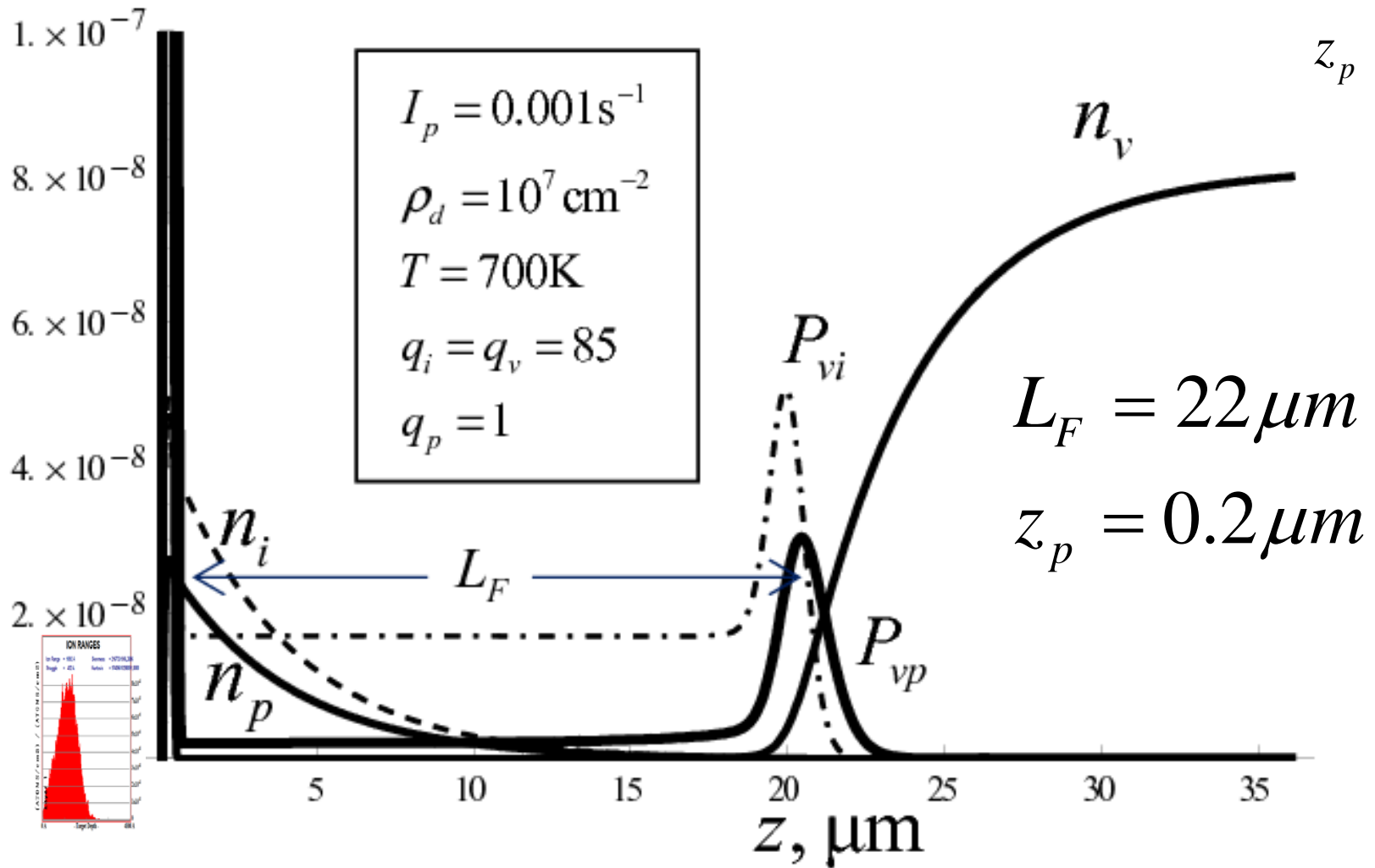


- 1-10с
- 2-10²с
- 3-10³с
- 4-10⁴с
- 5-10⁵с
- 6-10⁶с



----- - рівноважний розподіл вакансій

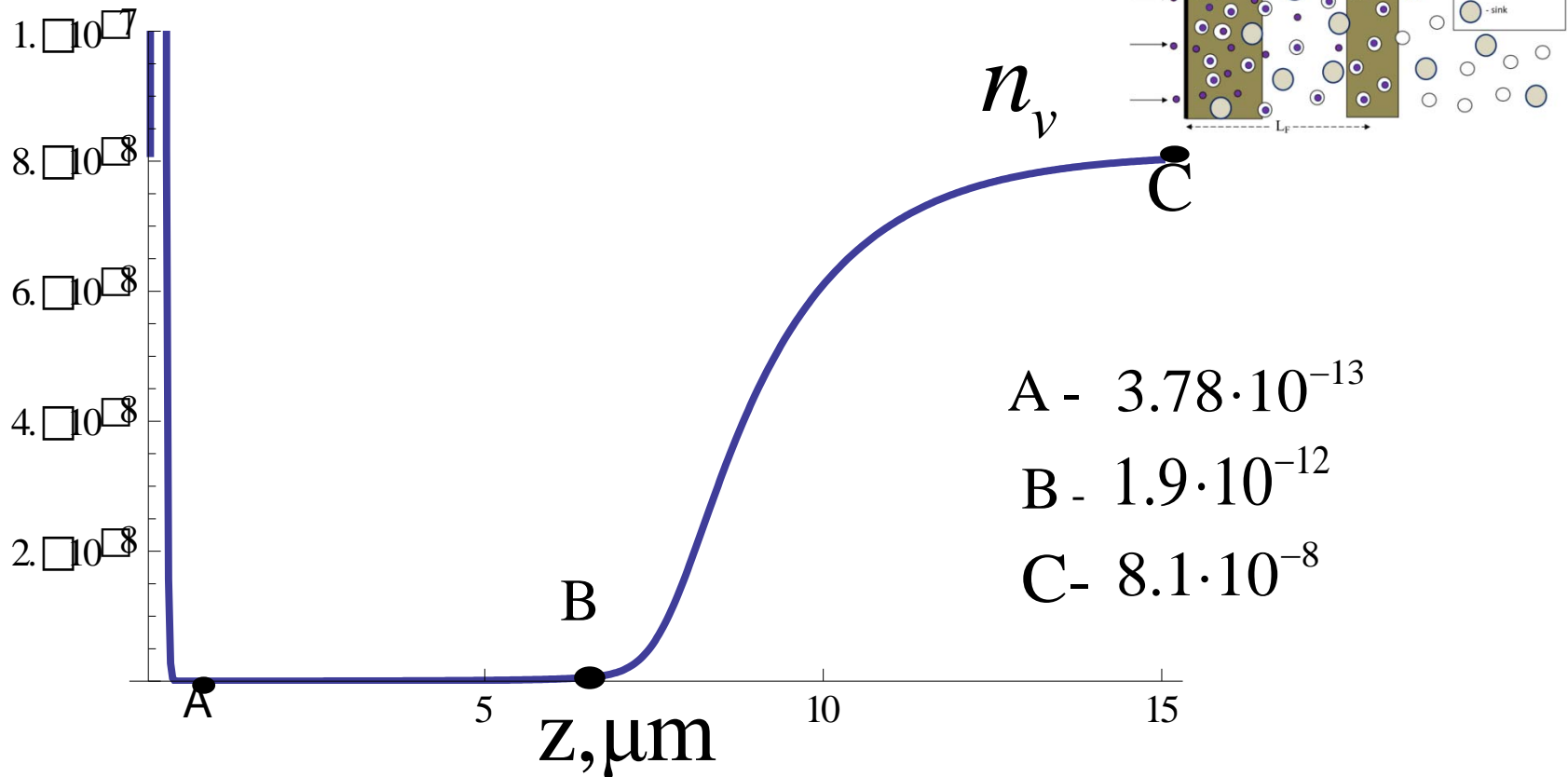
$$n_v, 2 \cdot 10^6 n_p, 3 \cdot 10^5 n_i, 5 \cdot 10^3 P_{vp}, 10^3 P_{vi}$$



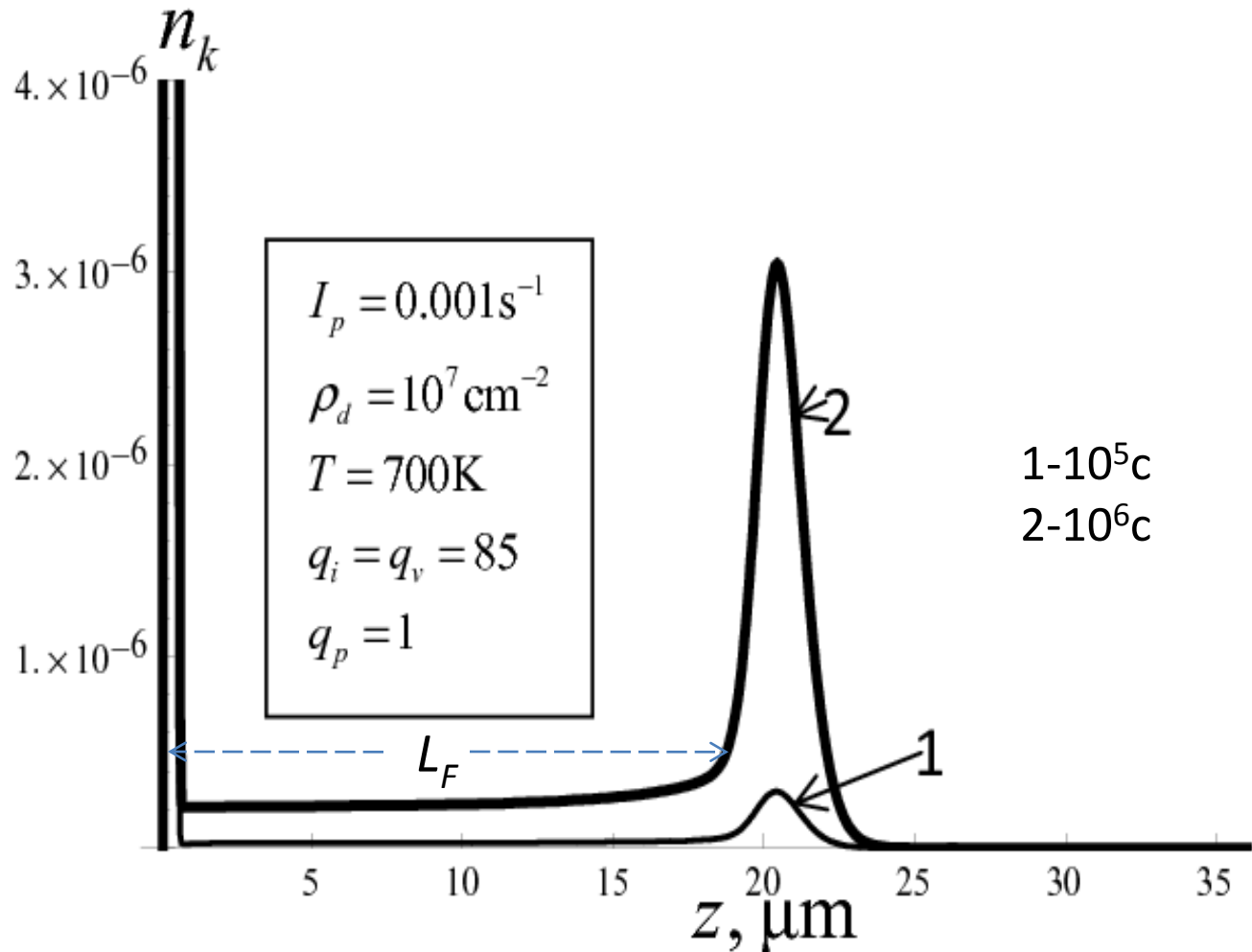
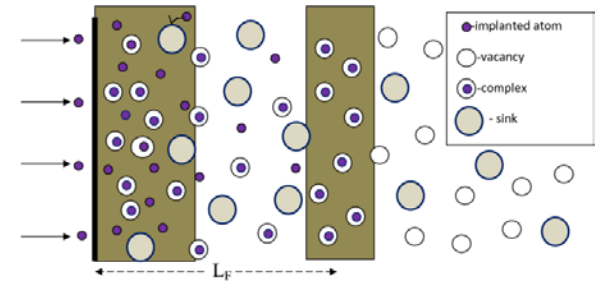
The spatial distributions of the point defect densities, recombination rates and complex-formation rates

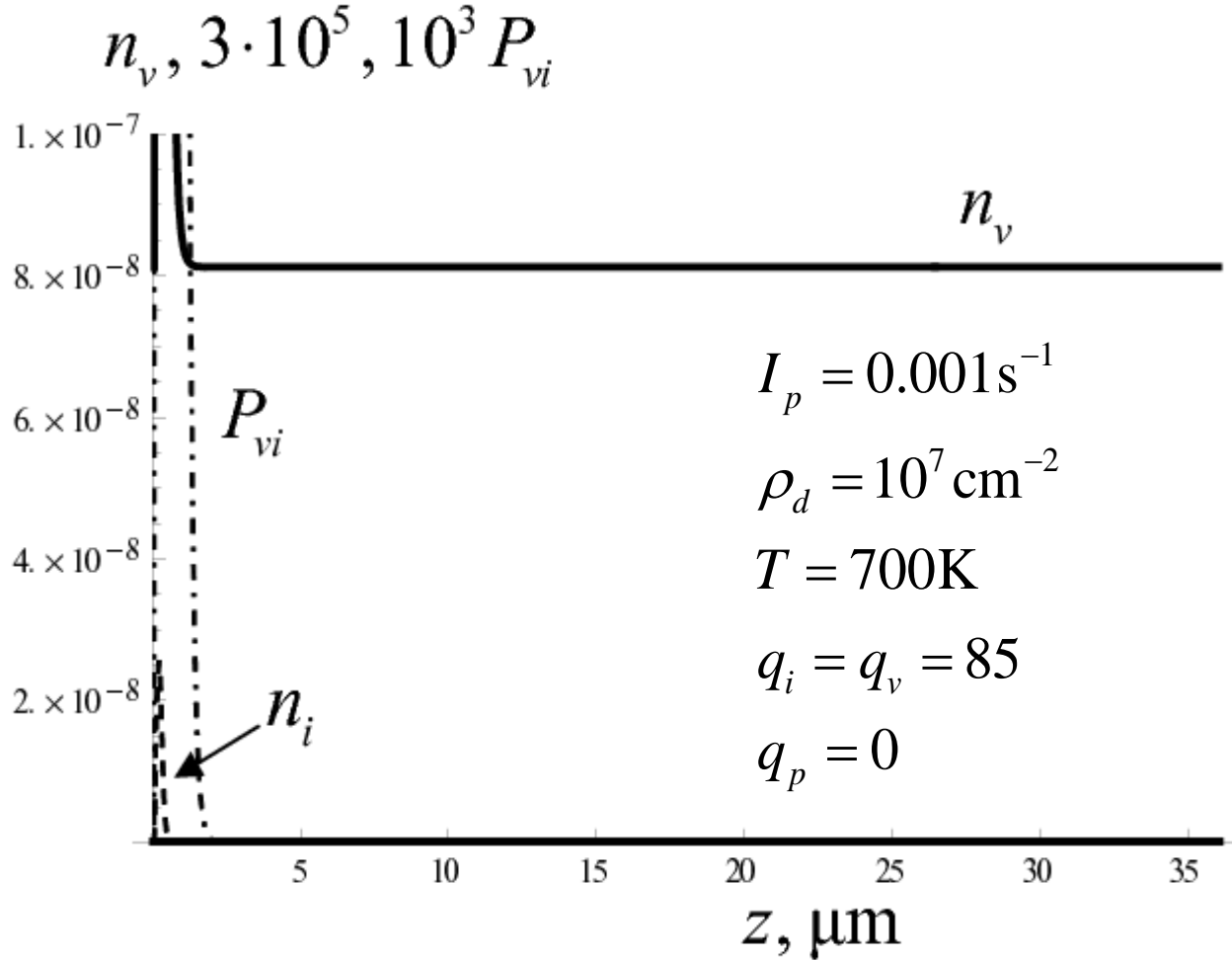
Наслідок. Дві особливості:

- 1) практичне зникнення вільних вакансій в певній області (з розмірами L_F) за межами пробігу,
- 2) поява максимуму в розподілі комплексів імпантований атом-вакансія на великій відстані від поверхні (L_F)



Ріст концентрації комплексів за межами пробігу

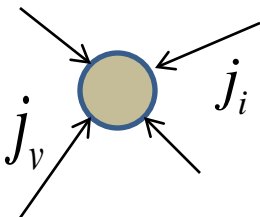




The case of the absence of the excess of the number of interstitials (both self-interstitials and implanted atoms) over the number of vacancies created by irradiation ($q_p = 0$).

Вплив на фізичні властивості

1. Зміна в співвідношеннях концентрацій вакансій і міжвузлових атомів створює різницю в їхніх потоках на стоки. В реакторах $G = K_v \approx 10^{-7}$ зміщень/атом в секунду. Тому кожний атом зміщується з вузла на протязі кількох місяців. Проте має місце рекомбінація дефектів.

$$\vec{j}_i = -D_i \vec{\nabla} n_i$$
$$\vec{j}_v = -D_v \vec{\nabla} n_v$$


При рівній потоках $D_i n_i = D_v n_v \quad \sum_{\alpha} j_{\alpha} = 0$

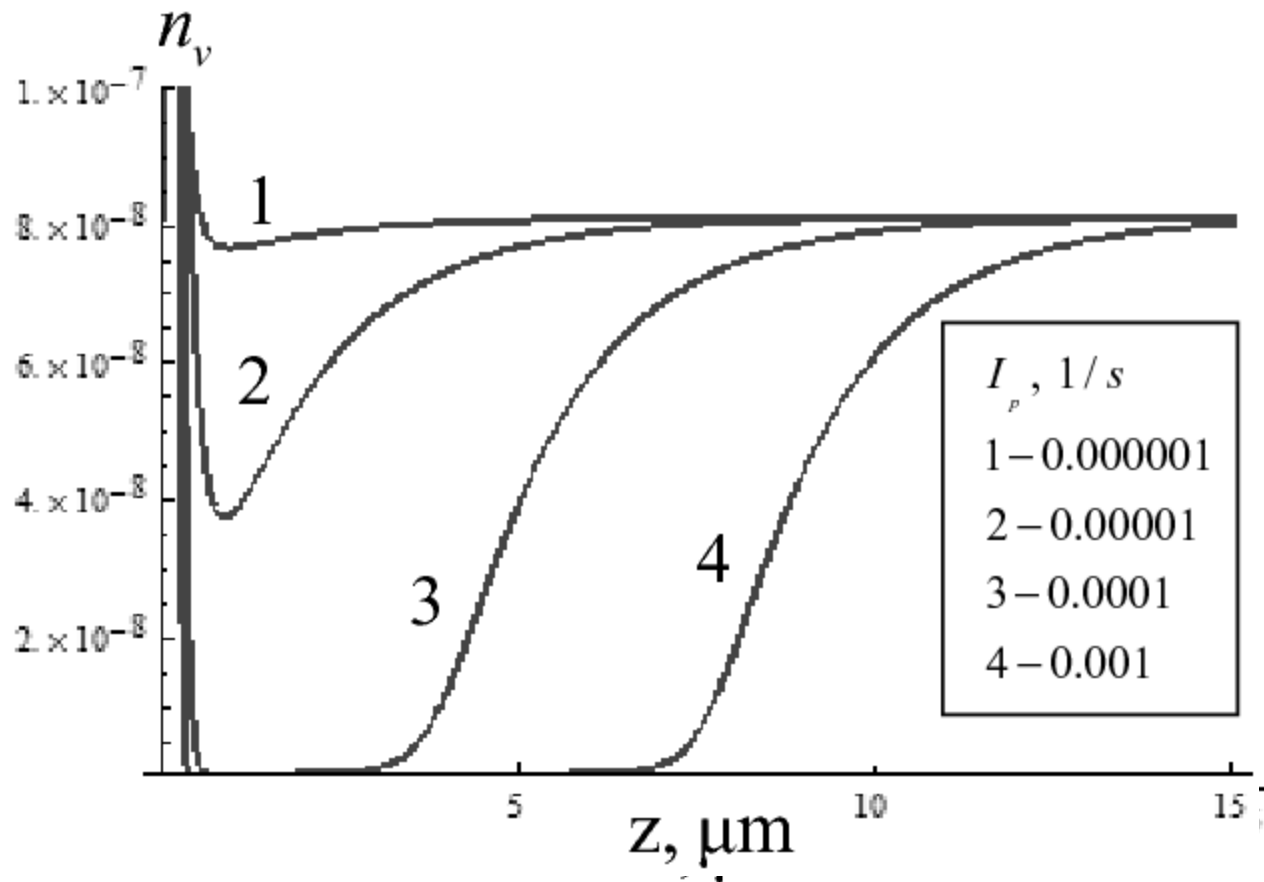
Наявність преференсу в захопленні дефектів приводить до різниці потоків і зміну стану системи. Проте преференс є невеликим. В розглядуваній задачі за межами пробігу $n_v \approx 0$ тому

$$D_i n_i \gg D_v n_v \quad \sum_{\alpha} j_{\alpha} \neq 0$$

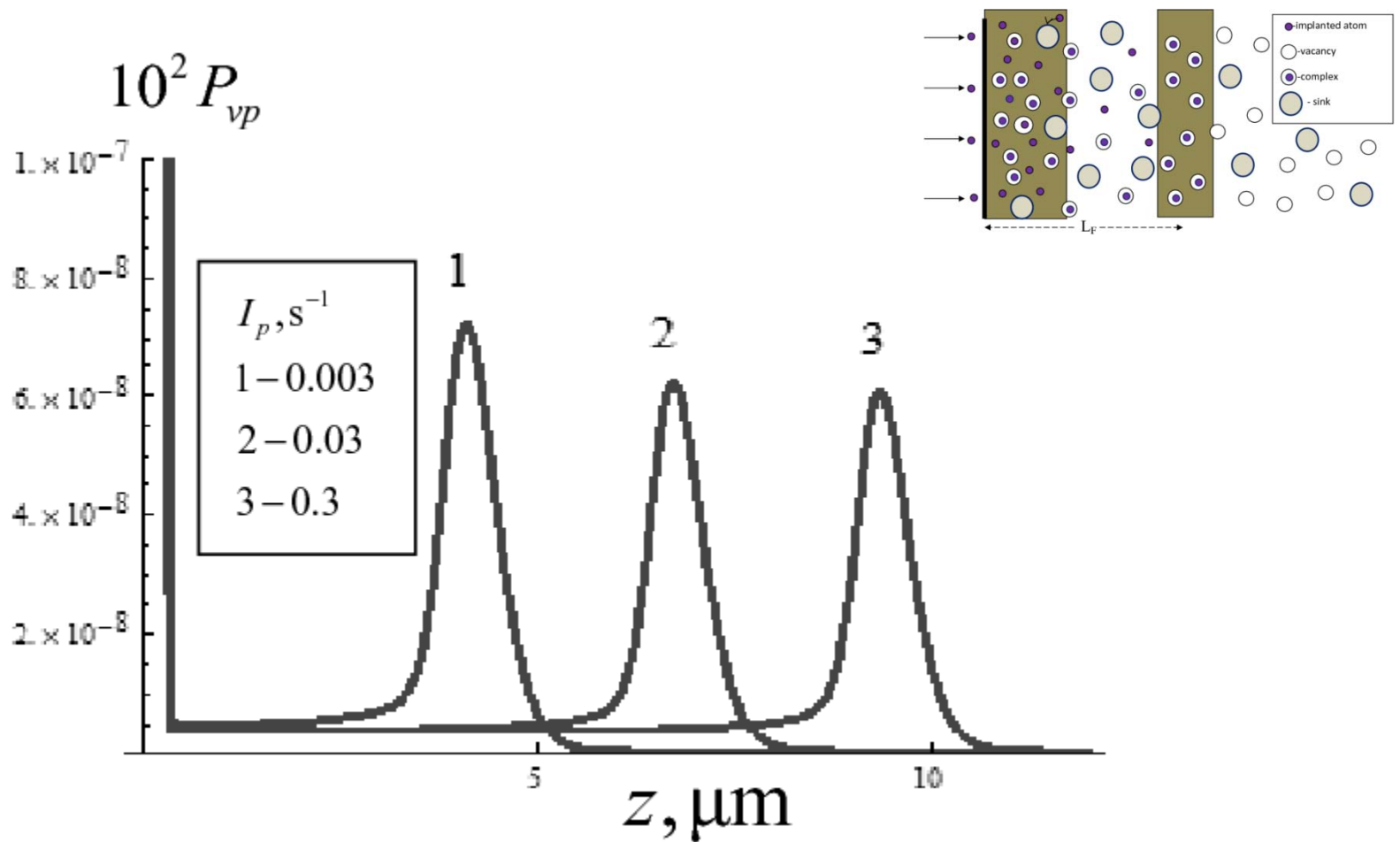
і характер радіаційних процесів змінюється.

2. Зникає вакансійний механізм дифузії атомів заміщення
3. Пересичення міжвузловими атомами може привести до виникнення нових фаз

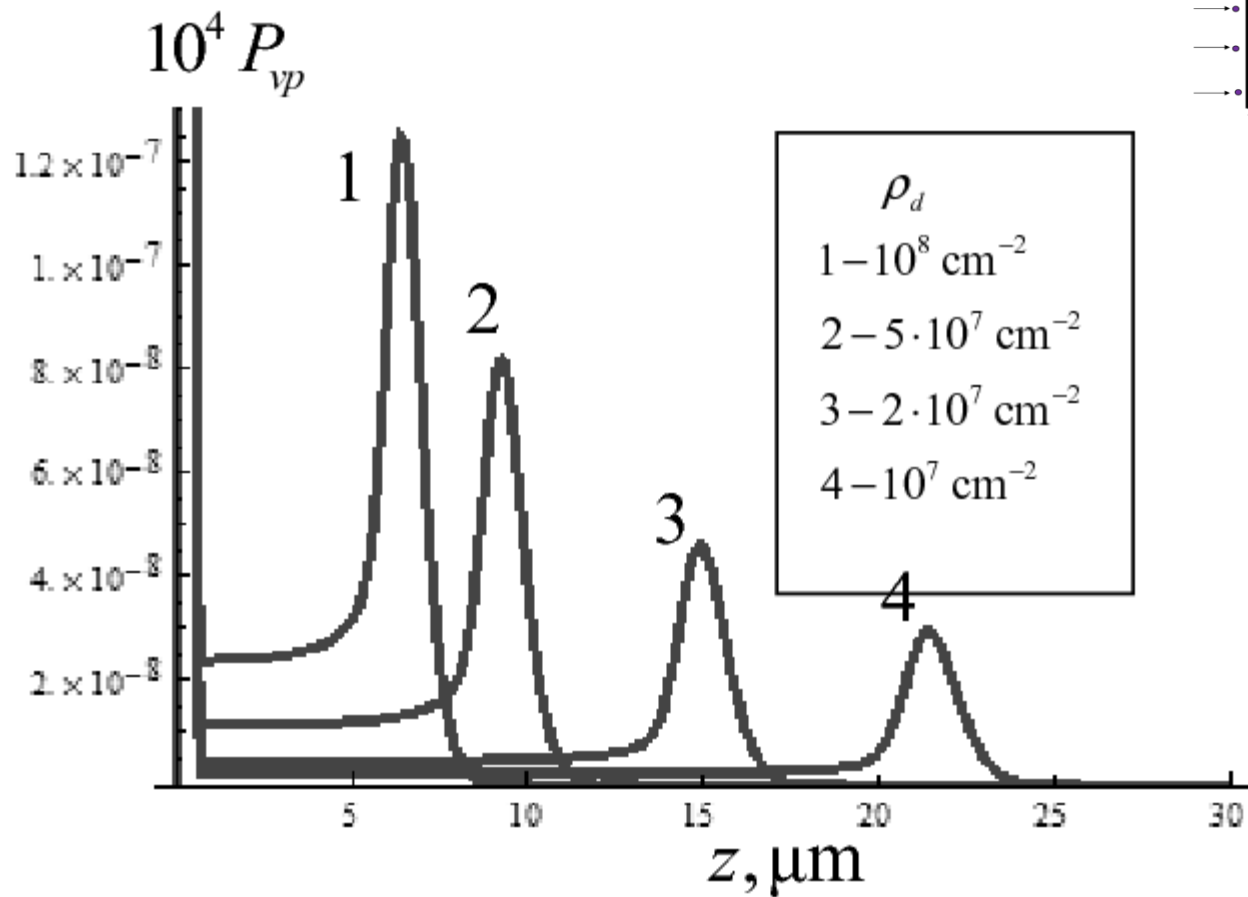
Пороговий характер ефектів



The spatial distributions of the vacancy density at different values of the incident flux.

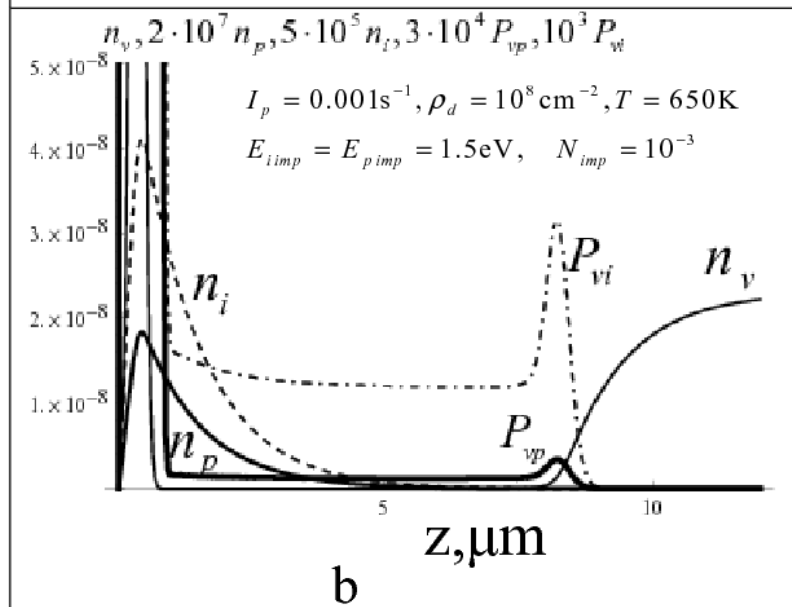
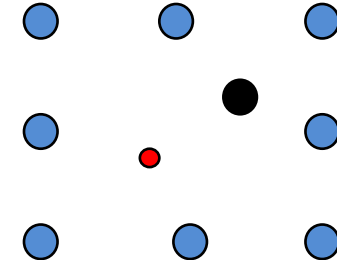
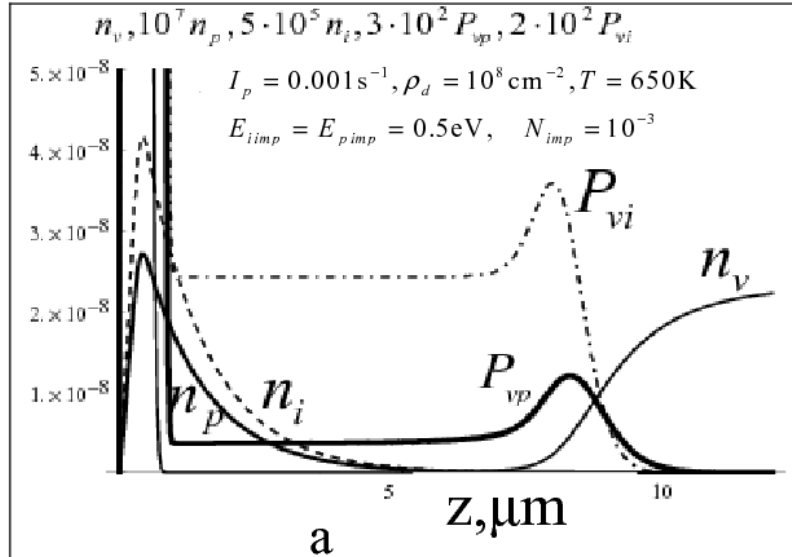


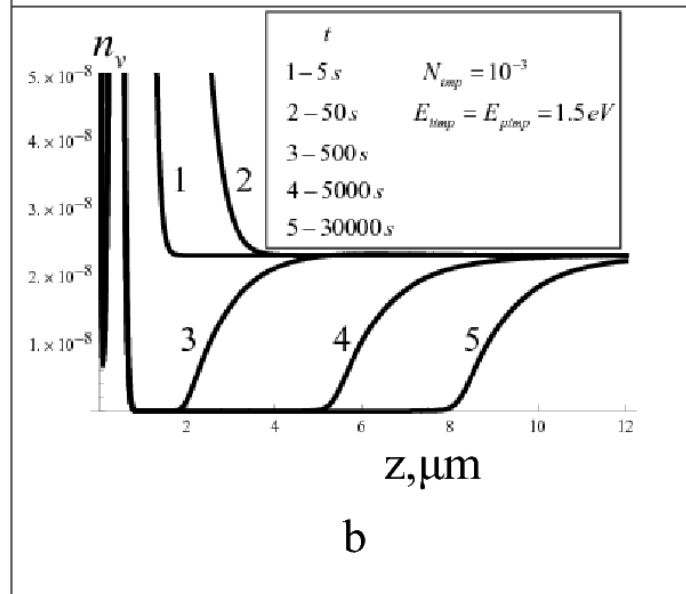
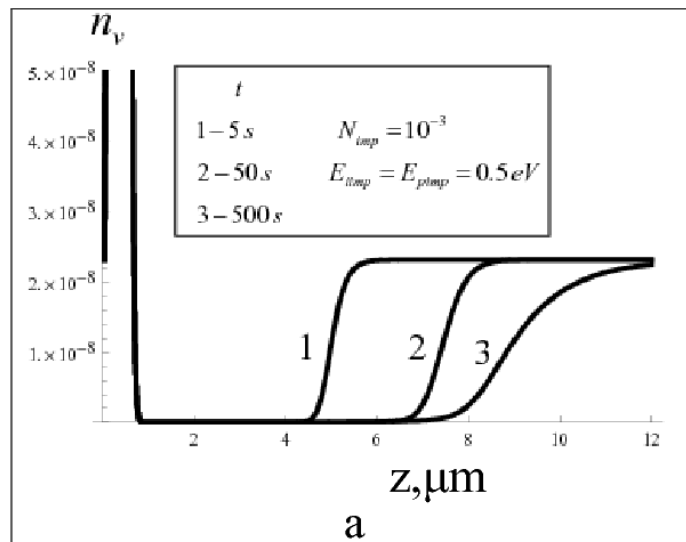
The spatial distributions of the rate of the binding of the implanted atom with the vacancy for different values of the incident flux.



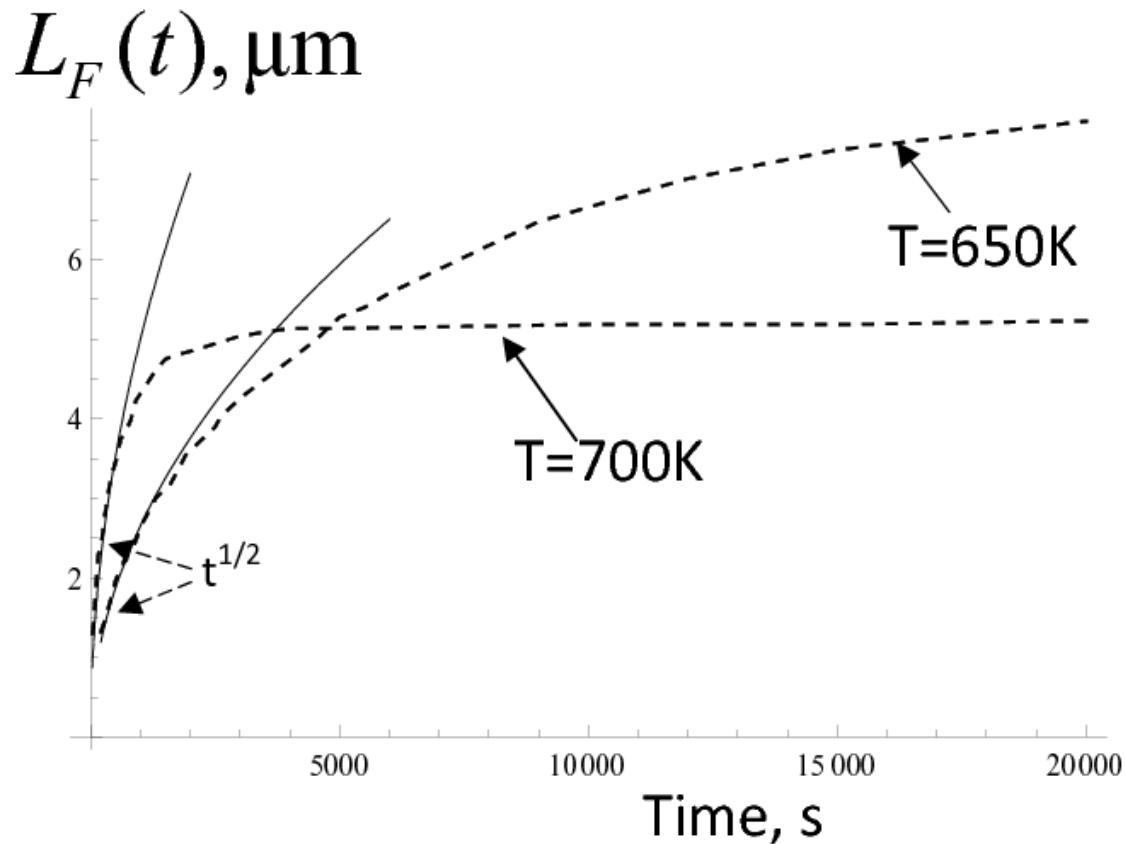
The spatial distributions of the rate of the binding of the implanted atom with the vacancy for different values of the dislocation density

Пастки, що насичуються





Наявність пасток з глибоким рівнем приводить до уповільнення процесів переносу



The dependence of the maximum position of the rate of the formation of complexes on time (dashed line) at different temperatures: $T=650\text{K}$ and $T=700\text{K}$.

He in tungsten

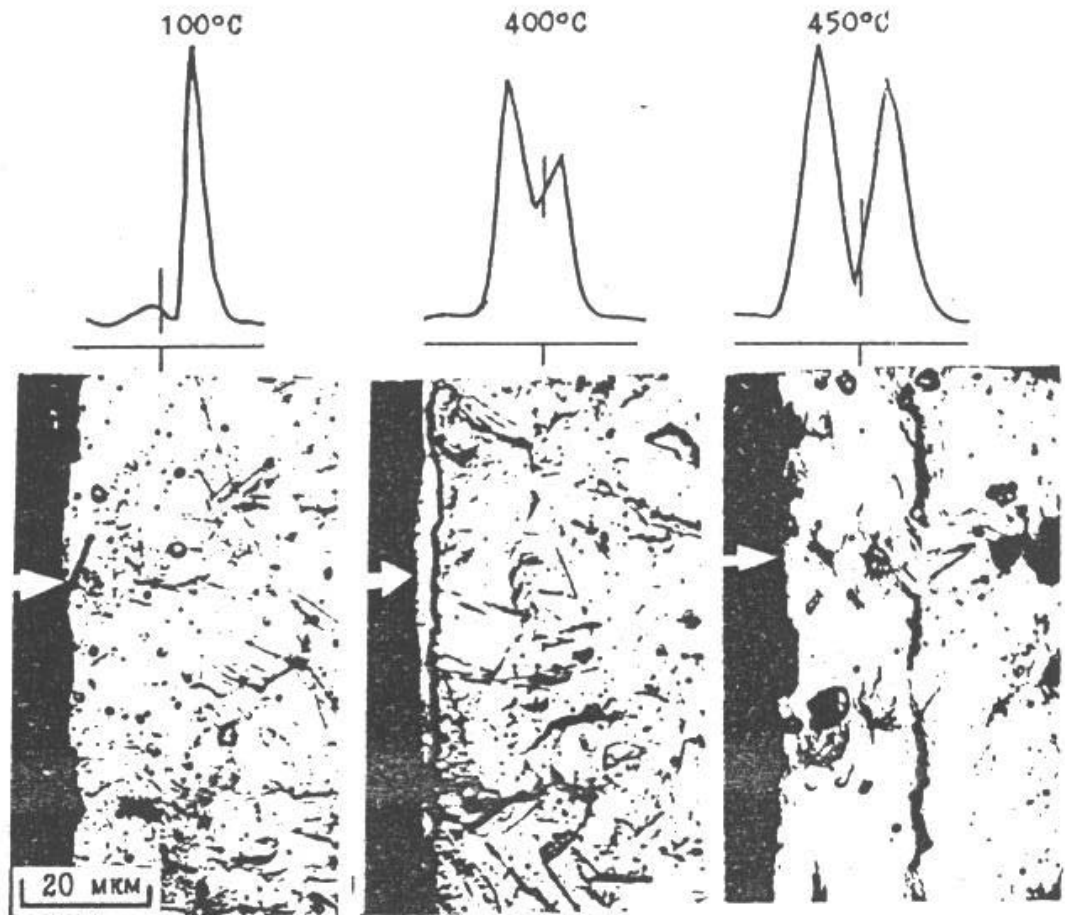


Рис. 1. Рентгеновские дифракционные линии (111) (вверху) и микроструктура сплава Fe-18Cr-10Ni после облучения при температурах 100, 400 и 450°С (Ar^+ , 50 кэВ, $5 \cdot 10^{17}$ ион/см²).

В.С. Хмелевская и др. Письма в ЖТФ, т.22,9 (1996)
 Утворення «радіаційних білих шарів».
 Також спостерігалися шари в Fe-Cr і V-Ti-Cr,

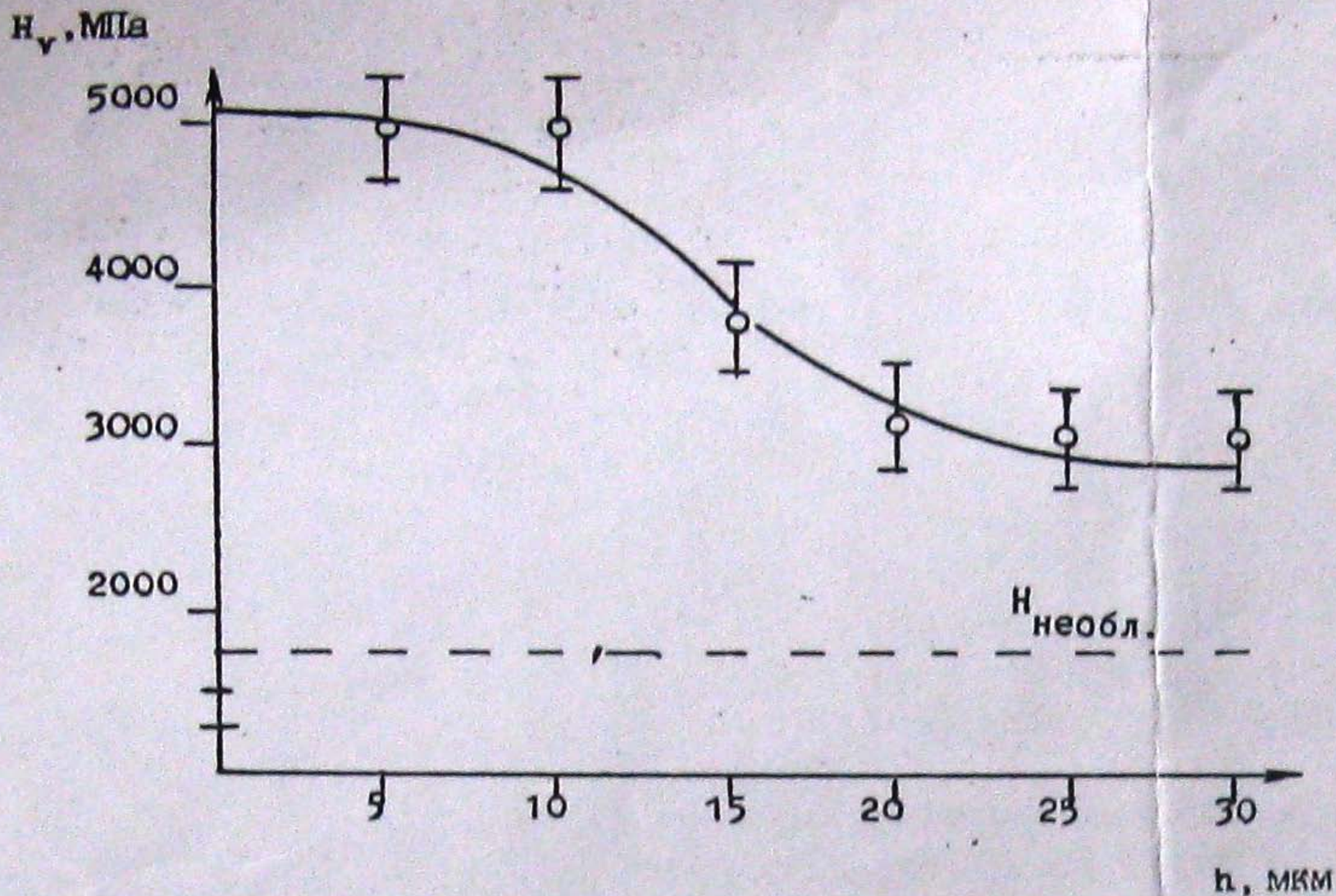


Рис. 3. Микротвердость облученного сплава Fe-18Cr-10Ni на различной глубине от поверхности.

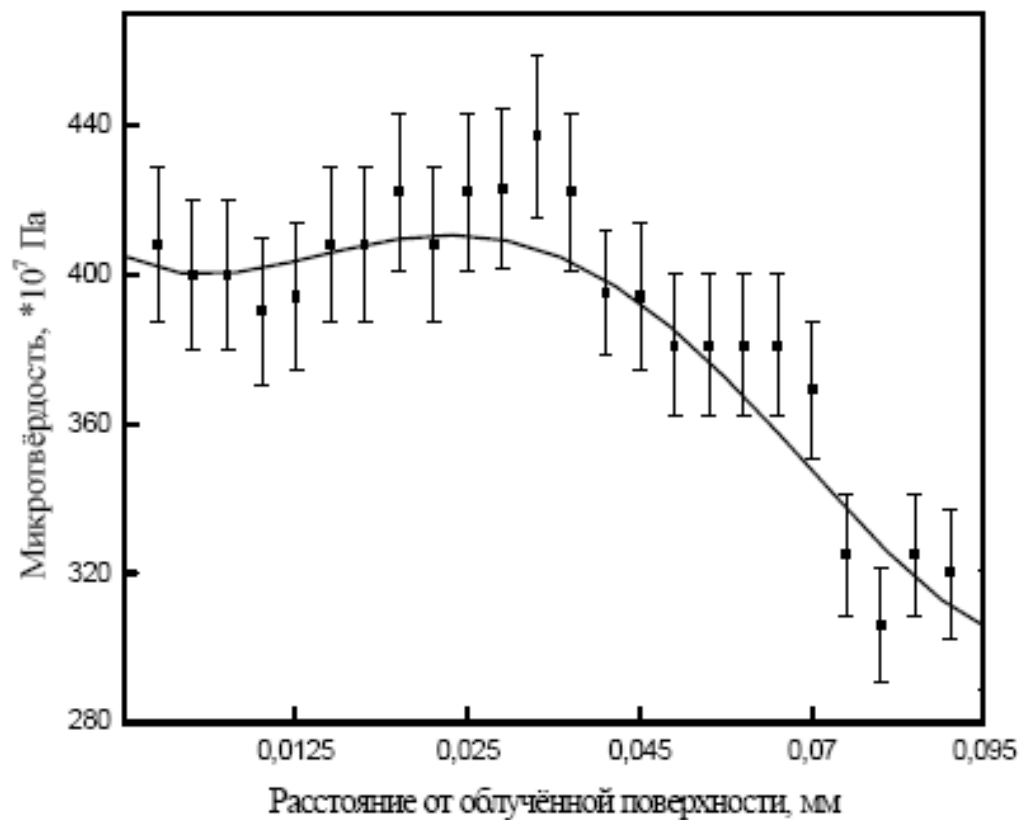


Рис. 1. Радиационное упрочнение сплава типа нимоник (Ni-Fe-Cr -Ti-Al) по сечению образца (Ar⁺, 20 кэВ, 1,5 · 10¹⁸ ион/см², 600°С)
 В.С. Хмелевская. В.Г. Малынкин

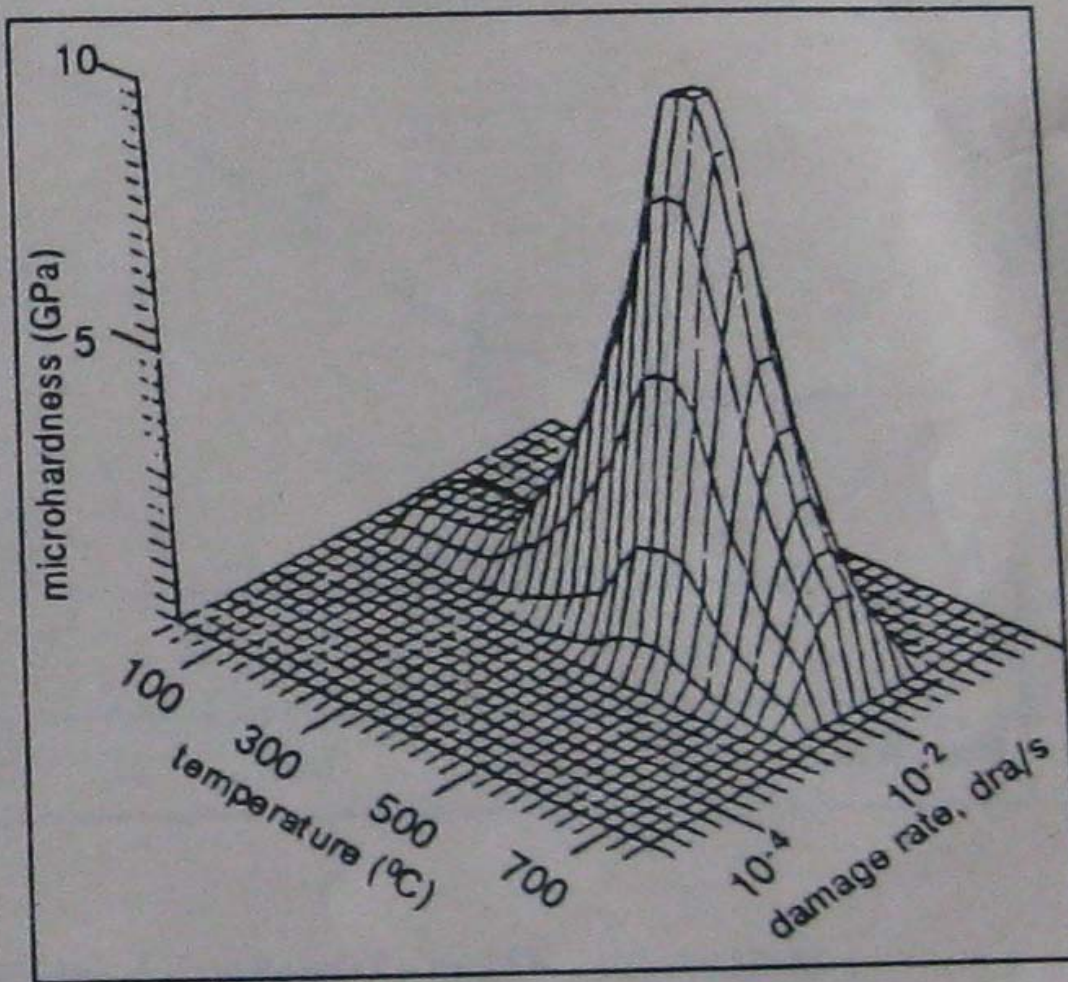


Fig.4. The microhardness dependence of the Fe-18Cr alloy on the irradiation temperature and the flux density (Ar^+ , 40 keV, $1,5 \cdot 10^{18}$ ion/cm²)

V.S. Khmelevskaya, V.G. Malyukin, S.P. Solov'ev. Известия Вузов
Ядерная энергетика, 1996.

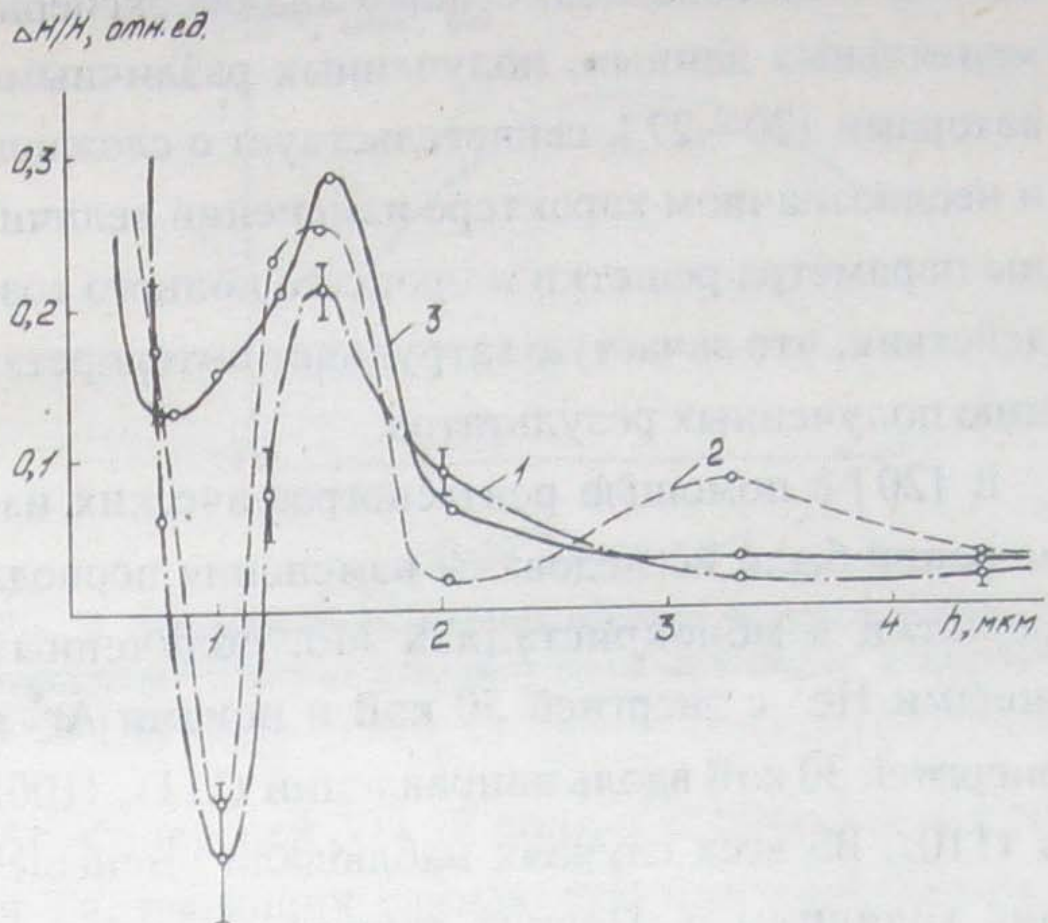


Рис. 2. Изменение относительной микротвердости по сечению образца титанового сплава ОТ-4 после бомбардировки ионами N^+ (1); Ag^+ (2) и $N^+ + Ag^+$ (3) с энергией 120 кэВ и дозой 10^{17} ион/ см^2 [16]

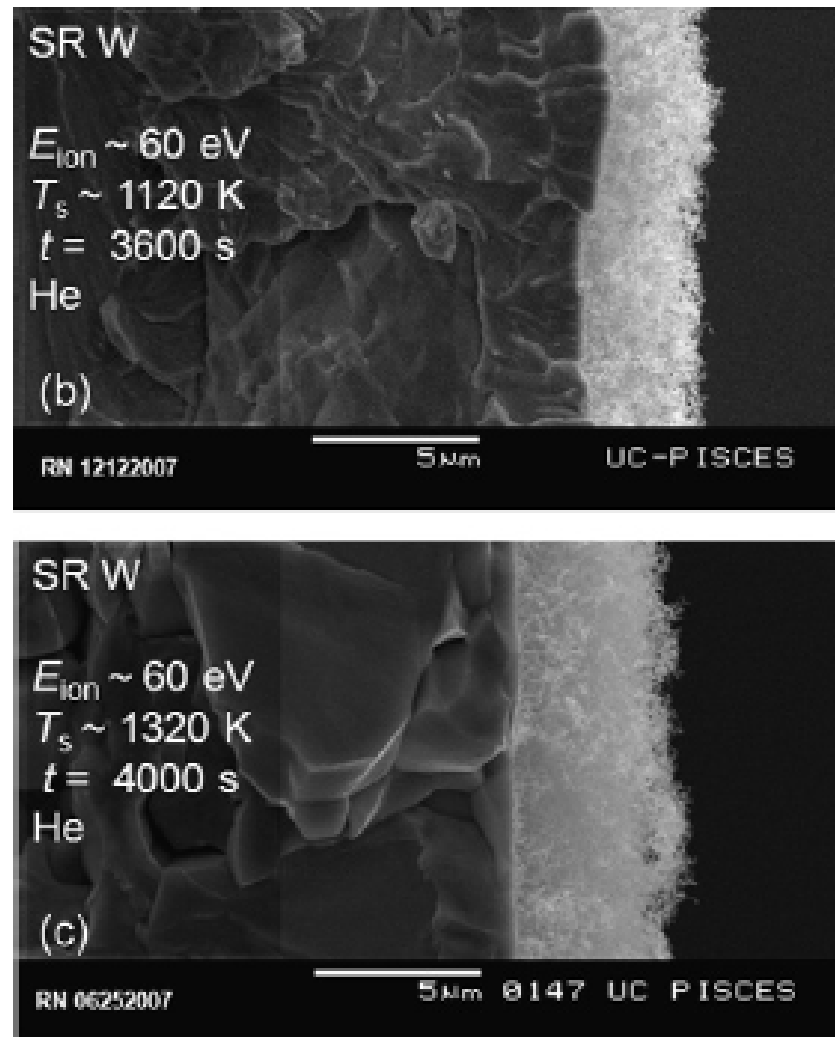


Fig. 2. Cross-sectional SEM micrographs of W targets exposed at (a) 900 K, (b) 1120 K, and (c) 1320 K to pure He plasma for ~ 1 h.

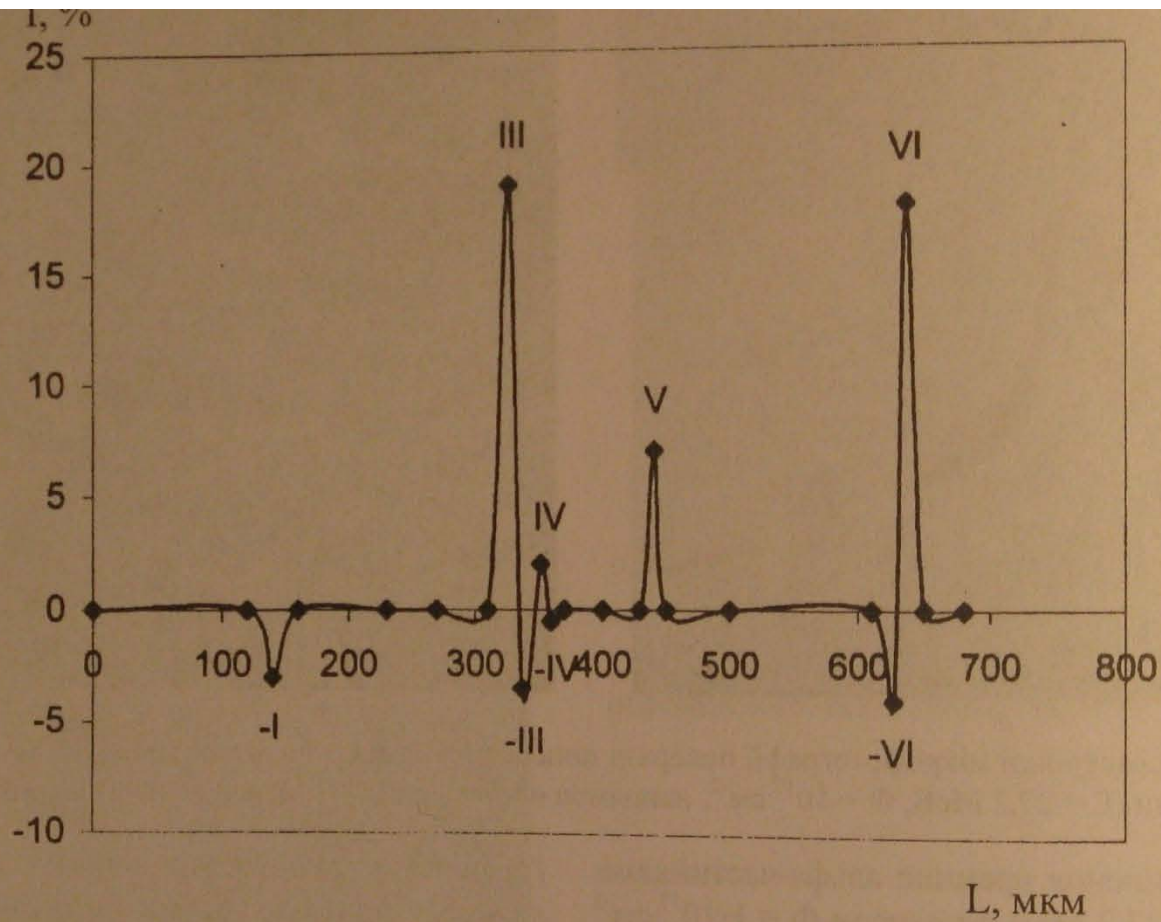


Рис. 4. Фотометрія растрової електронної мікрофотографії (див. рис. 3, б) поверхні поперечного перерізу зразка кремнію № 3, опроміненого альфа-частинками, напрямком опромінення по осі абсцис.

А.А.Гроза, П.Г. Литовченко, М.И. Старчик, В.И. Хиврич, Г.Г.Шматко, В.И. Варнина.
Ядерная физика и энергетика **11**, 66 (2010).

Висновки

- 1) Надлишок числа створених опроміненням атомів в міжвузловому положенні (власних і імплантованих) в порівнянні з числом вакансій, створених опроміненням, наявність нерухомих комплексів «вакансія-імплантований атом» та теплових вакансій приводять до виникнення поза областю проективного пробігу специфічної області, в якій концентрація вакансій є надзвичайно мала.
- Розмір області з малою концентрацією вакансій зростає при збільшенні інтенсивності падаючого потоку та зменшенні дефектності кристалу, набагато перевищує проективний пробіг і може досягати кількох десятків мікрометрів. В кінці області виникає пік концентрації комплексів.
- Наявність області з малою концентрацією вакансій та надлишка атомів у міжвузлових положеннях повинно вплинути на хід фізичних процесів – народження дислокацій, нових фаз, дифузії домішок та інших.

Обзоры

- 1. Быков В.Н., Малынкин В.Г., Хмелевская В.С. Эффекты дальнего действия при ионном облучении.// Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.- 1989, вып.3(50).-С. 45-52.
- 2. Пивоваров А.Л. Эффект дальнего действия при облучении металлов ионно-плазменными потоками.// Металлофизика и новейшие технологии.// -1994, Т.16, № 12. С -3-17.
- 3. Овчинников В.В. Радиационно-динамические эффекты. Возможности формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных сред. // УФН. -2008.- Т. 178, вып. 9. - С. 993 -1001.

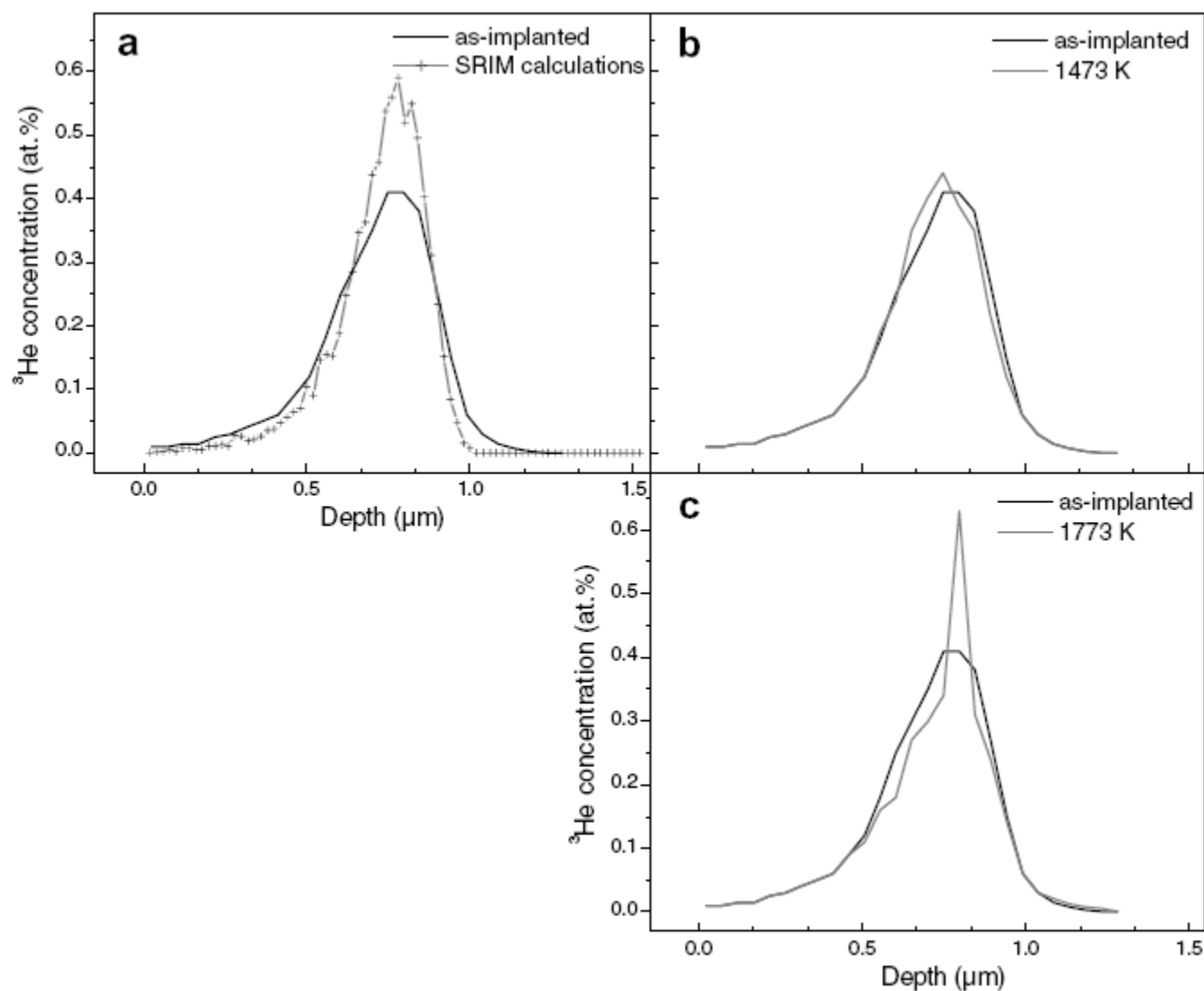


Fig. 3. (a) Theoretical (SRIM calculations) and experimental distributions of 500 keV ^3He ions implanted at a 10^{16} cm^{-2} fluence in tungsten at RT; (b) evolution of the experimental implantation profile after a thermal annealing at 1473 K during 70 min under vacuum and (c) after a thermal annealing at 1773 K during 1 h under Ar- H_2 atmosphere.