

Исследование эволюции профилей дефектов в процессе термического отжига кремния, аморфизованного имплантацией ионов германия

Investigation of the defect profiles evolution during thermal annealing of silicon amorphized by germanium ions implantation

Е. О. Паршин (par1959@yandex.ru), Н. С. Мелесов (melesovns@mail.ru)

Ярославский Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технологического института имени К. А. Валиева Российской академии наук, Ярославль, Россия

Abstract: The effect of various types of heat treatment on the structure of defects in silicon samples implanted with germanium ions is presented. The p-Cz-Si silicon samples were implanted with Ge⁺ ions with different energies. They were subjected to isochronous and isothermal annealing and rapid lamp annealing. The defect structure of these samples was investigated using the Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS) method.

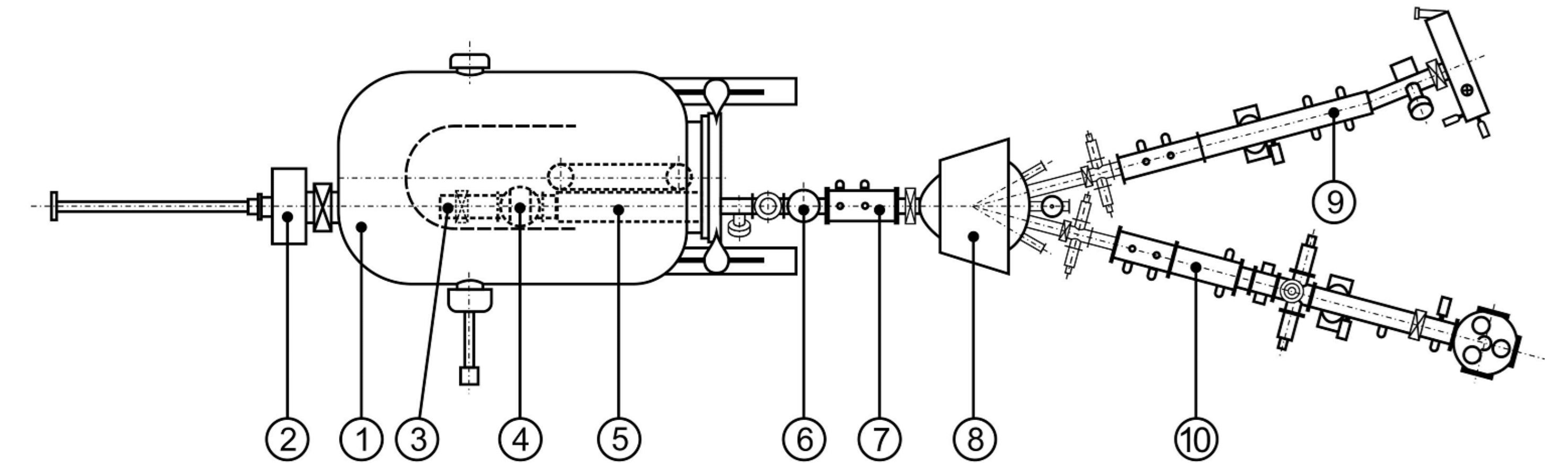


Рис. 1 – Система ионной имплантации и RBS анализа K2MV (High Voltage Engineering Europe B.V., the Netherlands). 1 – танк с изолирующей газовой средой, 2 – устройство замены ионного источника, 3 – ионный источник, 4 – система фокусировки и фильтрация пучка, 5 – ускорительная труба, 6 – вакуумный датчик, 7 – квадрупольная магнитная линза, 8 – система масс-сепарации, 9 – линия ионной имплантации, 10 – линия ионно-пучкового анализа.

Целью настоящей работы было изучение влияния различных видов термической обработки имплантированных ионами Ge⁺ образцов Si на структуру дефектов их кристаллической решётки.

В качестве подложек использовались пластины кремния, выращенного методом Чохральского, p-типа проводимости (p-Cz-Si) с удельным сопротивлением 10 Ω·см, толщиной 350 мкм.

Ионы Ge⁺ с энергией 1 MeV имплантировались при комнатной температуре с плотностью ионного тока 4 нА/см² с дозами 1,5×10¹⁴ см⁻², 2,5×10¹⁴ см⁻², 4,0×10¹⁴ см⁻², а также для создания протяженного профиля дефектов проводилась комплексная имплантация ионов Ge⁺ со следующим набором доз и энергий:

Энергия, МэВ	1,0	0,75	0,49	0,3
Доза, ион/см ²	6×10 ¹³	5×10 ¹³	4×10 ¹³	2,7×10 ¹³

Дефектная структура имплантированных слоев исследовалась с помощью метода резерфордовского обратного рассеяния (ROP) He⁺ с энергией 1,8 MeV и углом рассеяния 160° в режимах осевого каналирования (channeling) и псевдослучайного направления пучка (random). Ионная имплантация и исследования с помощью метода ROP проводились на установке K2MV фирмы High Voltage Engineering Europe (HVEE) (рис. 1), расположенной в ЯФ ФТИАН.

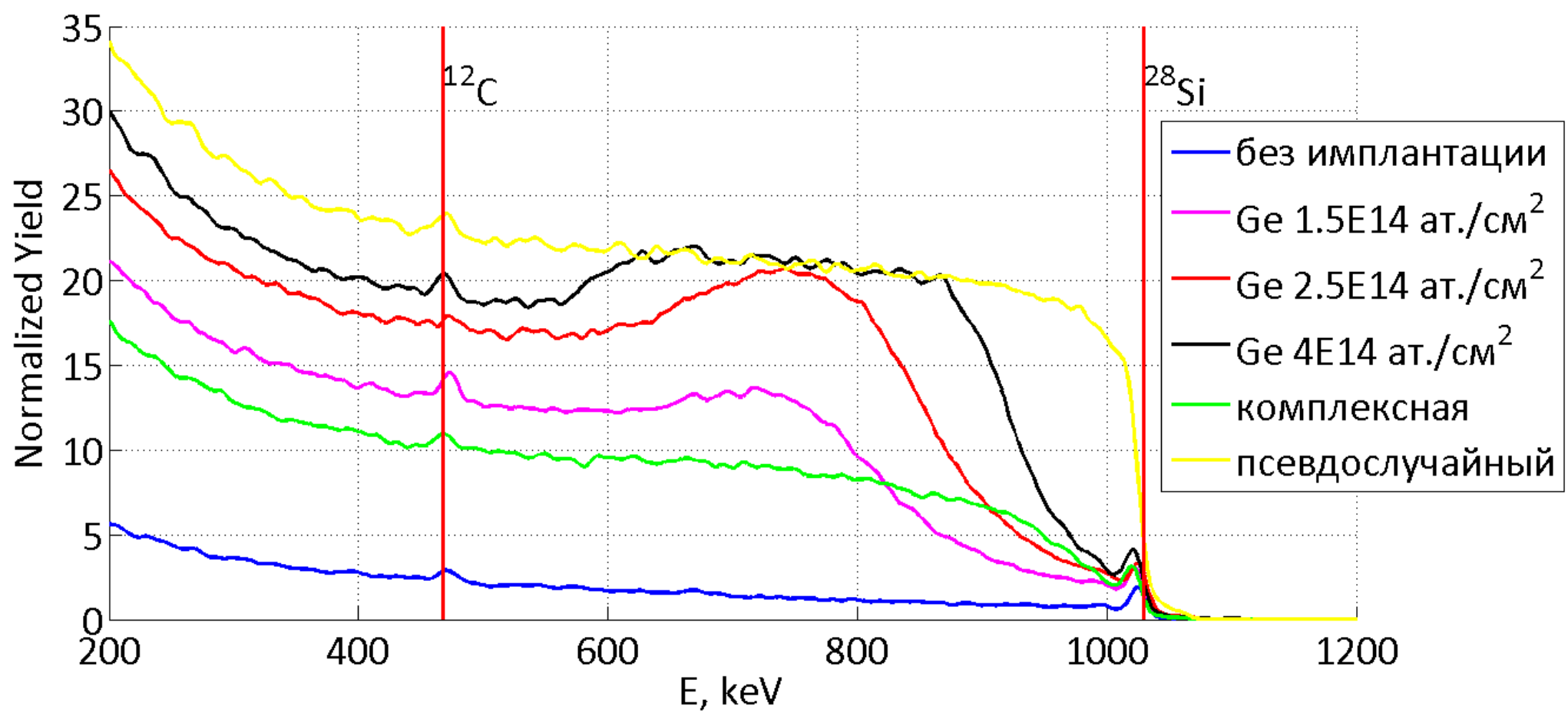


Рисунок 2 – Спектры ROP, набранные на образцах Si (100), имплантированных ионами Ge⁺, и эталонной пластине кремния без имплантации.

Профили распределения точечных дефектов получены методом последовательных итераций по разнице выхода рассеянных ионов He⁺ с образца с выходом, обусловленным деканалировавшей частью ионного пучка [1]:

$$\chi = \chi_R + (1 - \chi_R) \cdot n_D, \quad (1)$$

$$\chi_R = \chi_V + (1 - \chi_V) \cdot P_D, \quad (2)$$

$$P_D = 1 - \exp\left(-\int_0^t \sigma_D \cdot n_D \cdot dt\right), \quad (3)$$

$$\sigma_D = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Z_{He} \cdot Z_{Si} \cdot e^2 \cdot d}{E \cdot F_{RS}}, \quad (4)$$

где χ – нормированный на «псевдослучайный» выход от исследуемого образца с точечными дефектами; χ_R – часть этого выхода, обусловленная деканалированием ионного пучка; χ_V – нормированный на «псевдослучайный» выход от эталонного образца без дефектов («без имплантации»); P_D – вероятность деканалирования иона на пути до глубины t ; σ_D – сечение деканалирования на дефекте; n_D – концентрация дефектов; Z – атомный номер; d – расстояние между атомами вдоль канала; E – энергия иона; F_{RS} – безразмерный коэффициент, характеризующий искажение потенциала атомной цепочки из-за теплового движения (от 0,5 до 1,5).

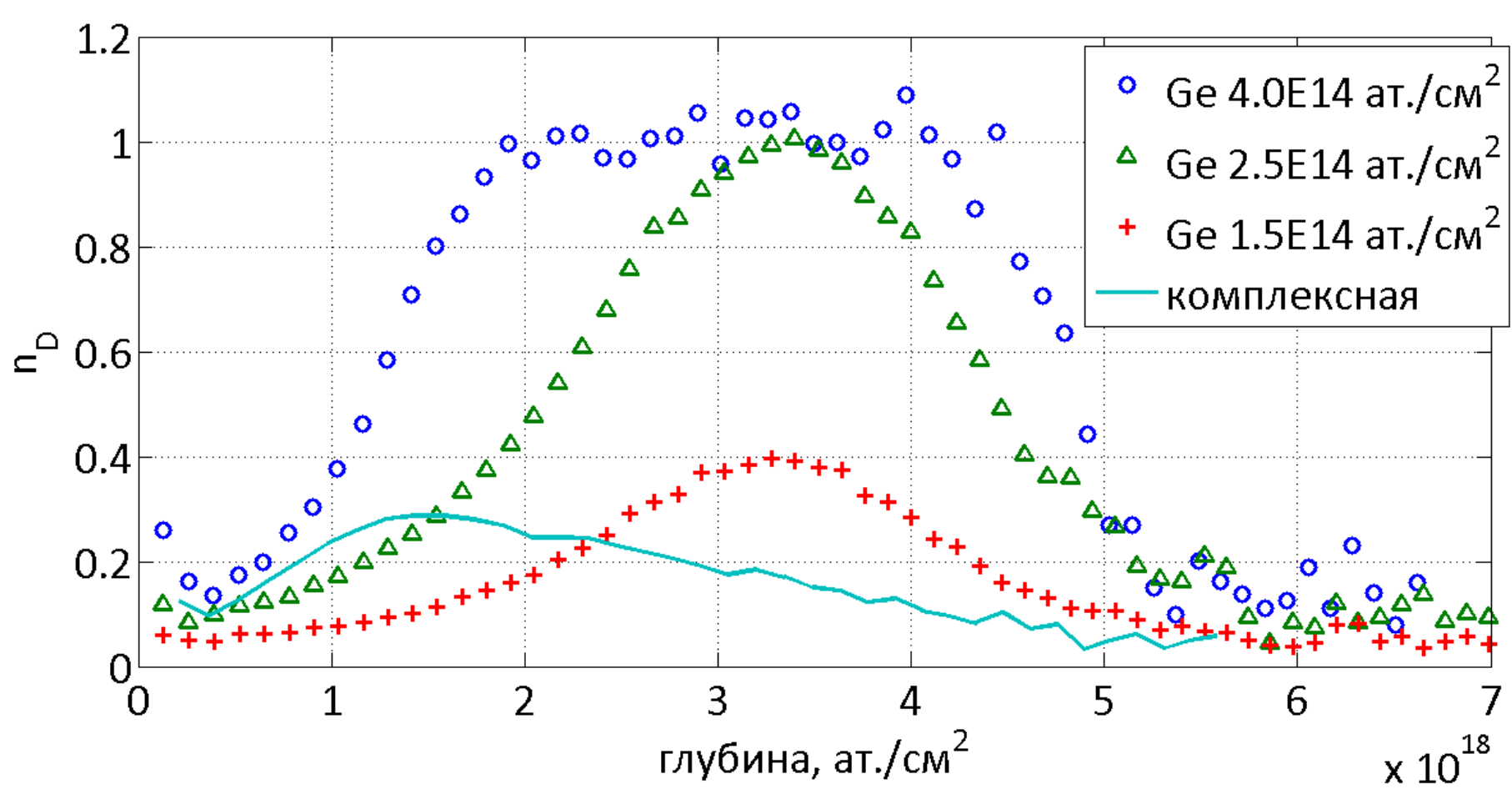


Рисунок 3 – Распределение точечных дефектов после имплантации.

Постимплантационный изотермический отжиг образца с комплексной имплантацией осуществлялся в трубчатой печи СДОМ 3/100М1 в атмосфере (Ar +5% O₂) при температуре 620°C в течение 10, 20 и 30 минут, а также проводился быстрый (ламповый) отжиг в установке градиентной термообработки ПТКО-АНТЗ при температуре 620°C в течение 10, 20 и 30 секунд.

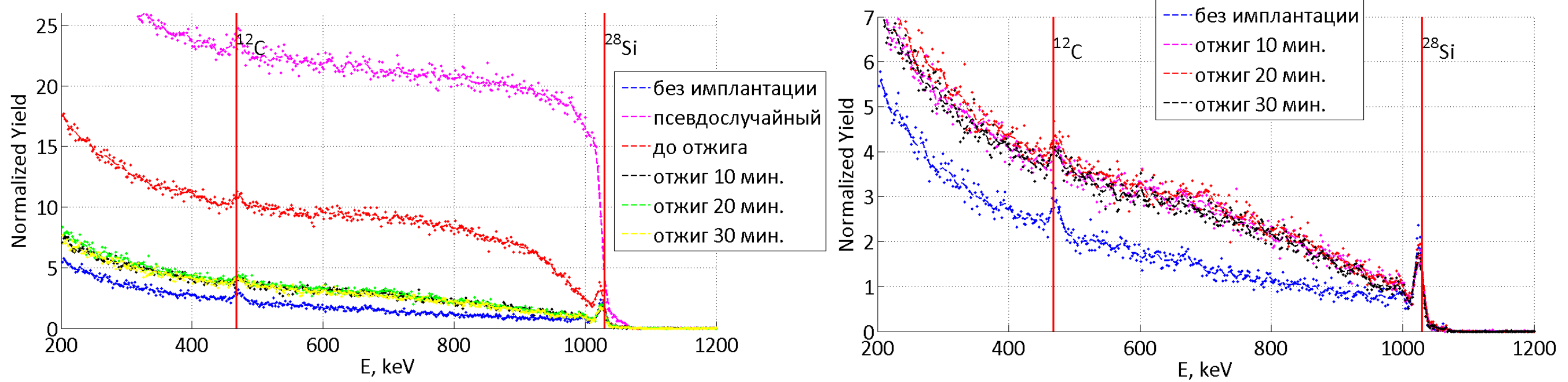


Рисунок 4 – Спектры ROP после изотермического отжига образца с комплексной имплантацией в трубчатой печи СДОМ-3/100М1 при температуре 620°C в течение 10, 20 и 30 минут.

Профили протяжённых дефектов, содержащихся в образцах после отжига, построены методом численного дифференцирования функции деканалирования:

$$F_R = -\ln \frac{1 - \chi_R}{1 - \chi_V} = \int_0^t \sigma_D n_D dt, \quad (5)$$

где χ_R – нормированный на «псевдослучайный» выход от исследуемого образца с дефектами; χ_V – нормированный на «псевдослучайный» выход от эталонного образца без дефектов («без имплантации»); σ_D – сечение деканалирования на дефекте; n_D – концентрация дефектов на глубине t . [2]

Поскольку сечение деканалирования зависит от типа дефекта, требует модельных приближений и в общем случае не известно, то профили протяжённых дефектов приводятся в относительных единицах (концентрация помноженная на сечение деканалирования) – правая шкала. Для сравнения также дан профиль точечных дефектов до отжига – левая шкала.

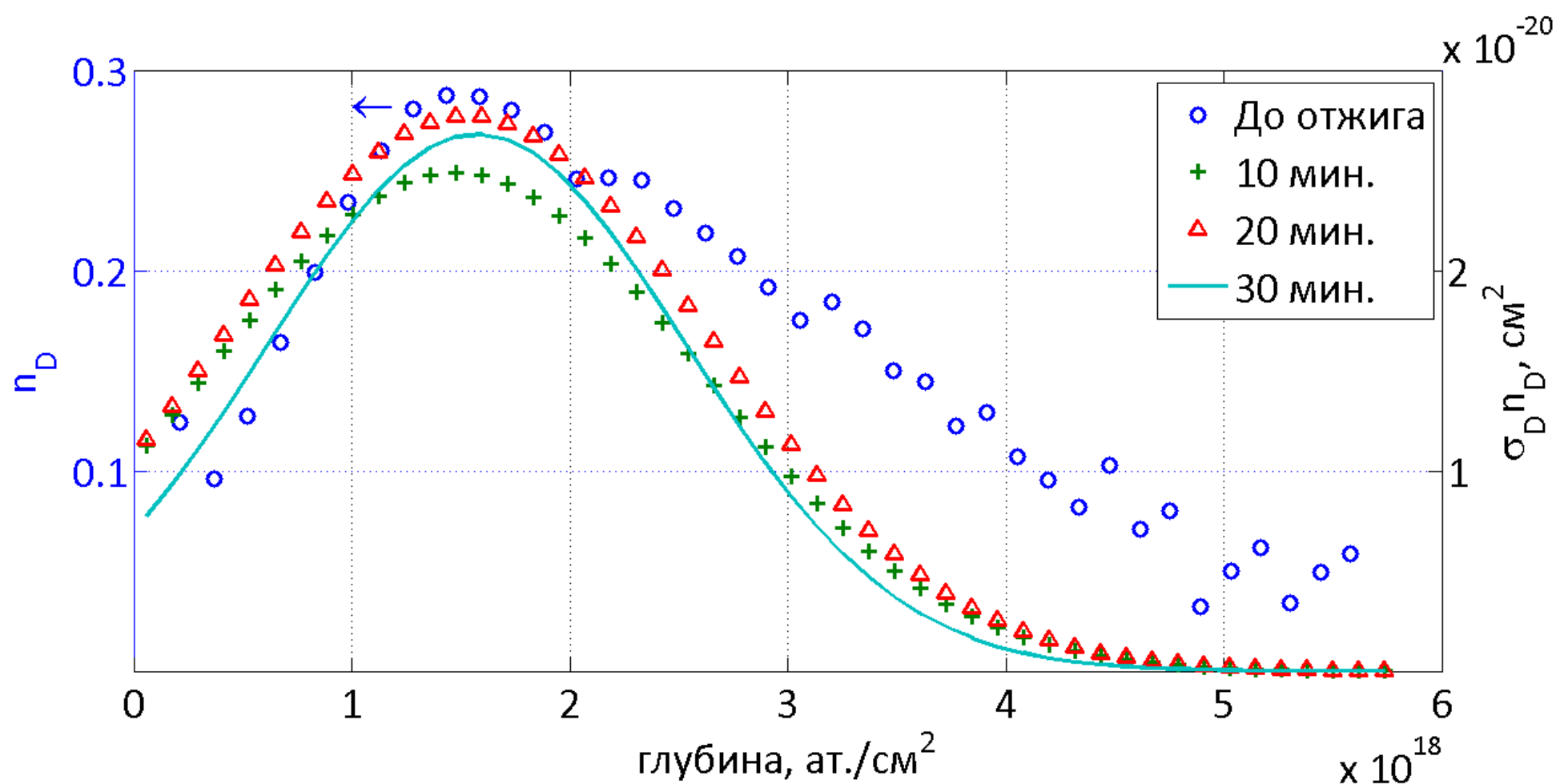


Рисунок 5 – Профиль распределения дефектов после изотермического отжига образца с комплексной имплантацией в трубчатой печи СДОМ-3/100М1 при температуре 620°C в течение 10, 20 и 30 минут.

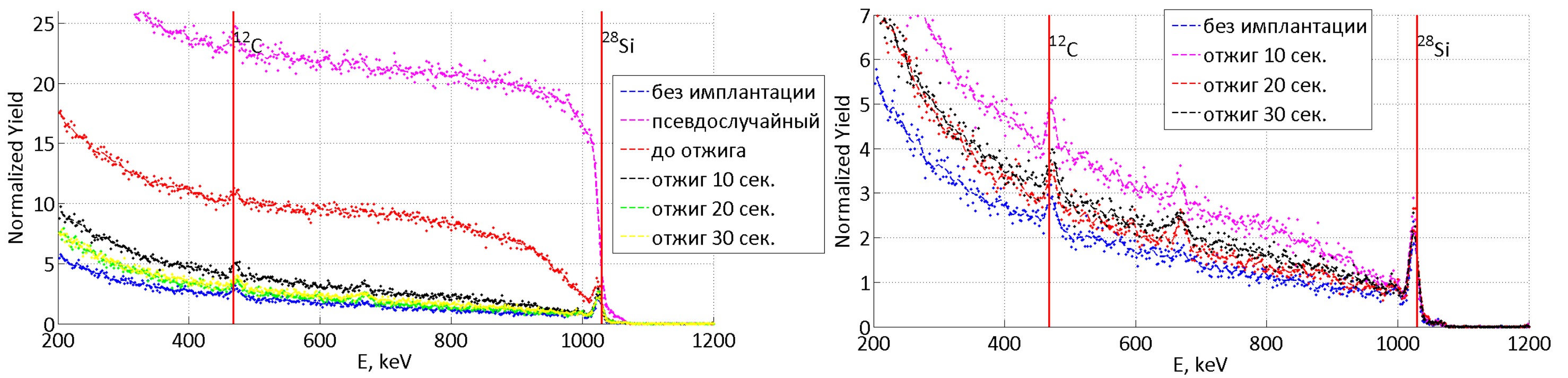


Рисунок 6 – Спектры ROP после изотермического отжига образца с комплексной имплантацией в установке быстрого (лампового) отжига ПТКО-АНТЗ при температуре 620°C в течение 10, 20 и 30 секунд

Профили протяжённых дефектов (после отжига) приводятся в относительных единицах – правая шкала. Для сравнения также приводится профиль точечных дефектов до отжига – левая шкала.

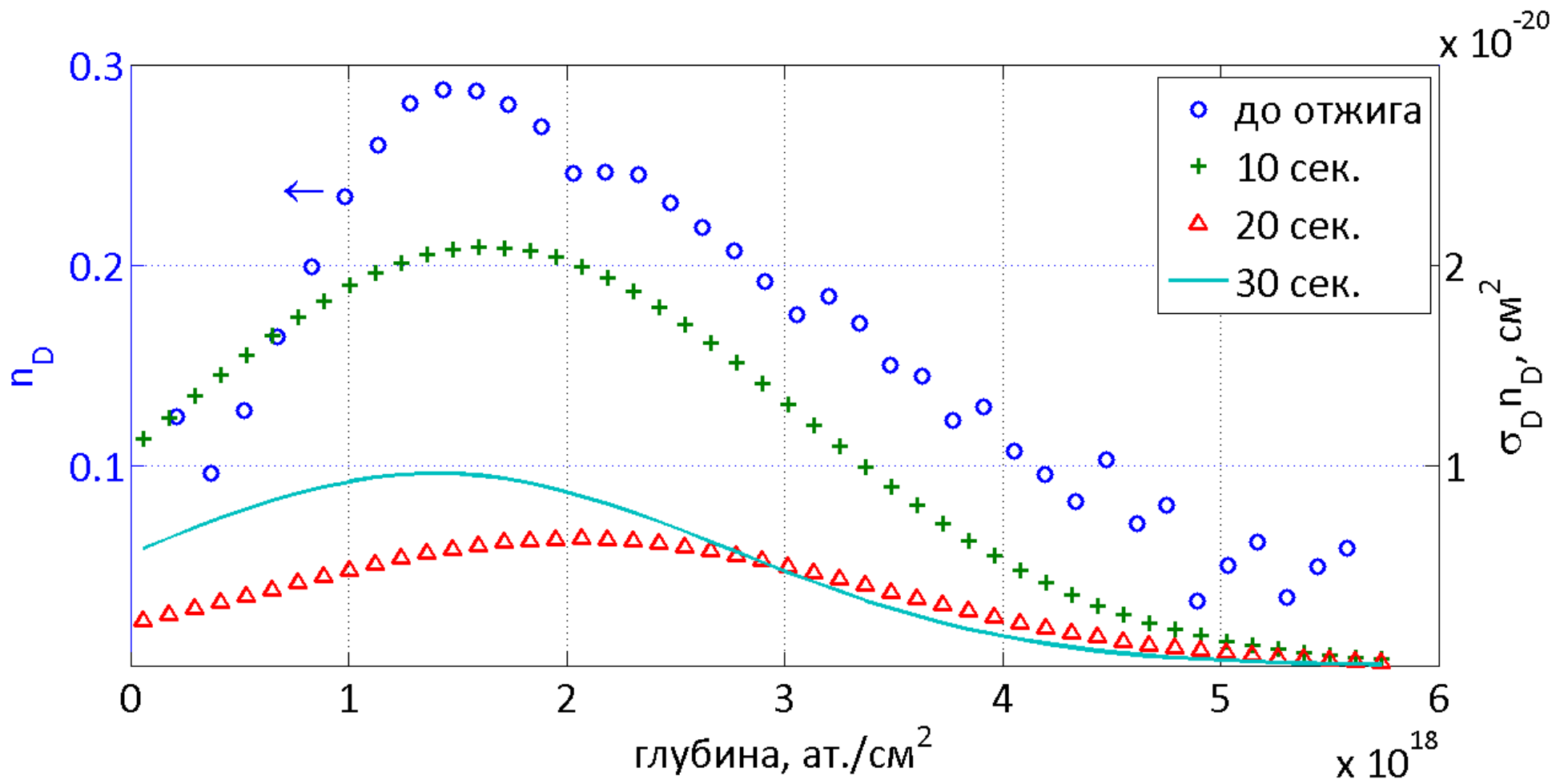


Рисунок 7 – Профиль распределения дефектов после быстрой термической обработки в установке быстрого (лампового) отжига ПТКО-АНТЗ при температуре 620°C в течение 10, 20 и 30 секунд

Постимплантационный изохронный отжиг осуществлялся в трубчатой печи СДОМ 3/100М1 в атмосфере (Ar +5% O₂) в течение 30 минут при температурах 600°C и 900°C. Отжигу подвергался образец с комплексной имплантацией из другой партии, чем в предыдущих экспериментах (отличалась технология изготовления – имплантация производилась в обратном порядке).

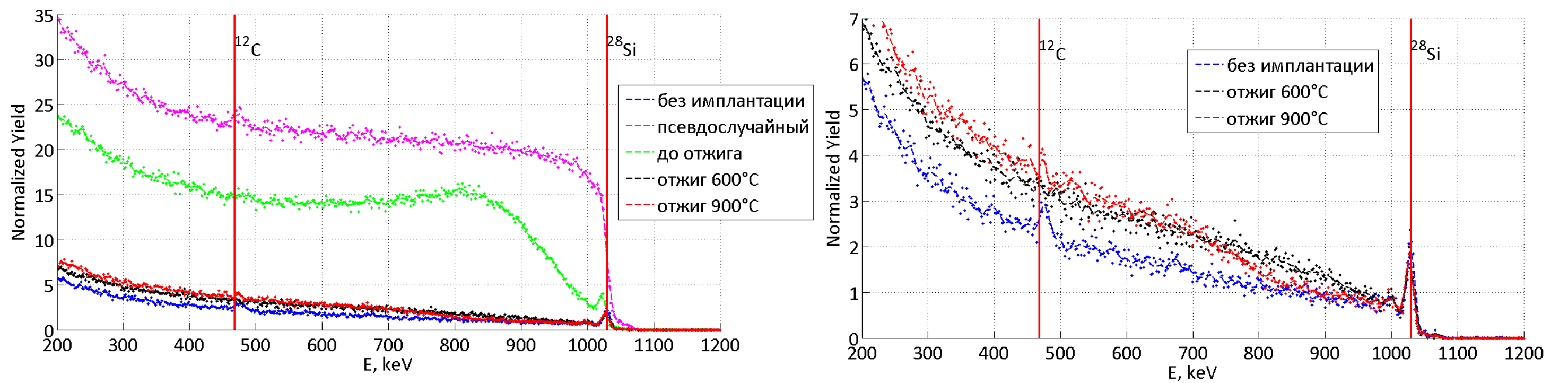


Рисунок 8 – Спектры ROP после изохронного отжига образца с комплексной имплантацией в трубчатой печи СДОМ-3/100М1 в течение 30 мин. при 600°C и 900°C.

Зависимость сечения деканалирования в образце, отожжённом при 600°C, от энергии показала, что здесь по прежнему преобладают точечные дефекты. Поэтому по формуле (4) для него концентрация дефектов была переведена в абсолютные единицы. Для образца, отожжённого при 900°C, профиль дефектов представлен в относительных единицах.

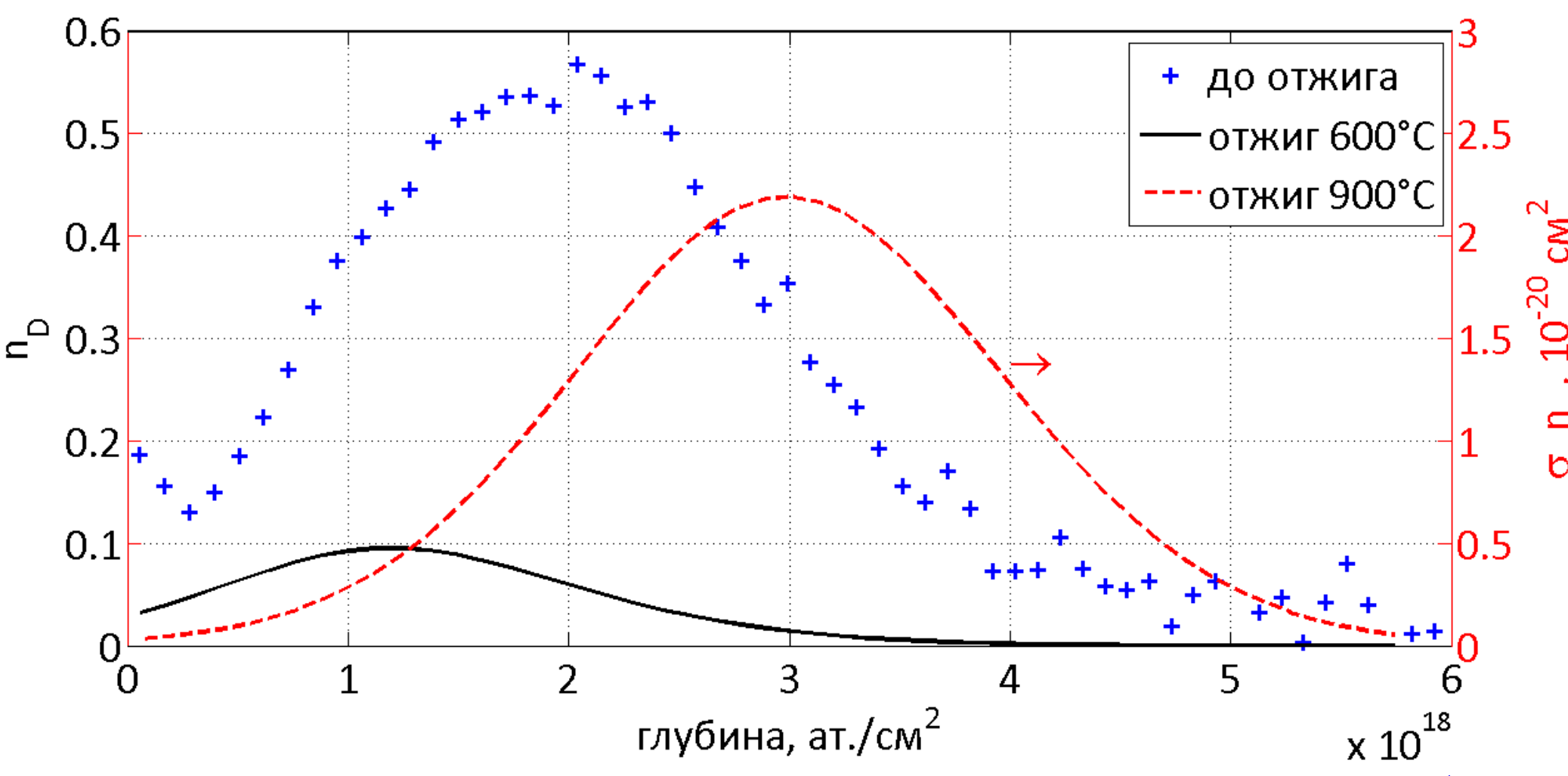


Рисунок 9 – Профиль распределения дефектов после изохронного отжига в трубчатой печи СДОМ-3/100М1 в течение 30 мин. при 600°C и 900°C.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. J.R. Bird and J.S. Williams eds., Ion Beams for Materials Analysis, Academic Press, Sydney, 1989, 719 p.

2. Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов, И.С. Ташлыков. Неразрушающий анализ поверхностей твердых тел ионными пучками. Минск: «Университетское», 1987, 250 с..