

Дефекто-примесная инженерия в ионно-имплантированном кремнии

Комаров Фадей Фадеевич
Мильчанин Олег Владимирович

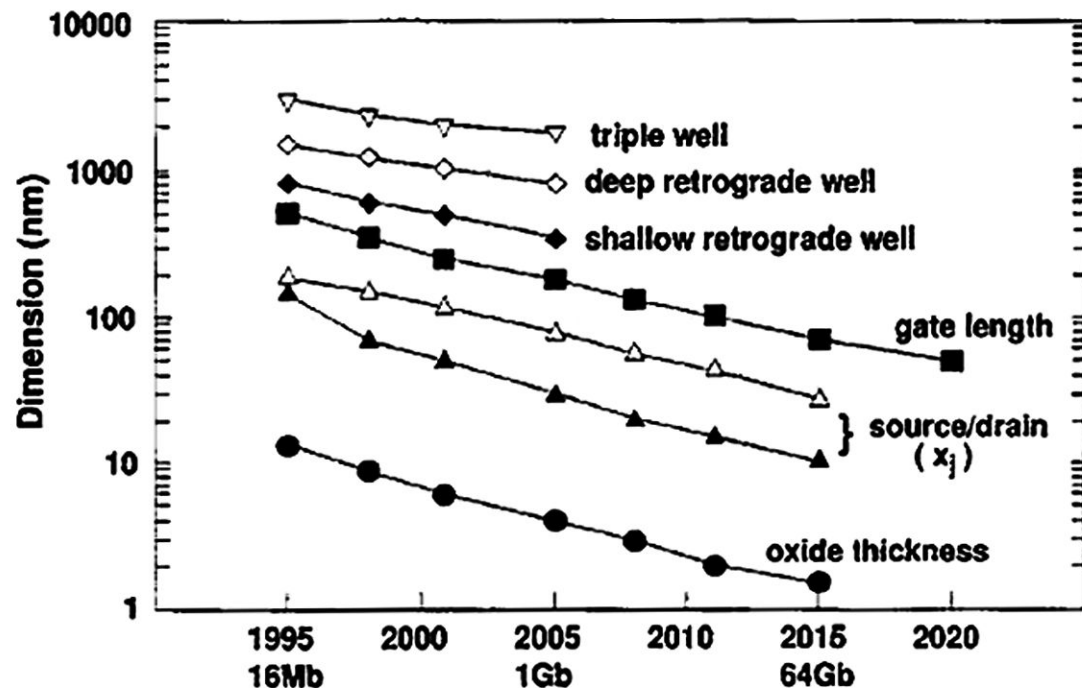
Цель: исследовать процессы электрической активации и диффузии атомов легирующей примеси, формирования и эволюции вторичных дефектов структуры в тонких слоях кремния при низкоэнергетичной имплантации ионов и последующей термообработке, а также при использовании подходов, позволяющих снижать неравновесную ускоренную диффузию легирующей примеси.

Задачи:

- исследовать основные закономерности диффузионного перераспределения атомов легирующей примеси при различных температурах и длительностях отжига;
- исследовать процессы дефектообразования при низкоэнергетичной имплантации легирующей примеси и последующей термообработки;
- разработать и оптимизировать режимы дополнительных низкотемпературных обработок и совместной имплантации ионов углерода с целью снизить неравновесную ускоренную диффузию легирующей примеси при отжиге имплантированных слоев кремния

УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЛЕГИРОВАННЫХ ОБЛАСТЕЙ

Основная тенденция развития микроэлектроники – уменьшение вертикальных и линейных размеров легированных областей в кремниевой подложке.



Пути решения:

1) Создание новых методов формирования p-n переходов

PIII - плазменная иммерсионная ионная имплантация;

P-GILD – проецированное газово-иммерсионное лазерное легирование;

RVD – быстрое газо-фазное легирование;

$B_{10}H_{12}$ – кластерная имплантация.

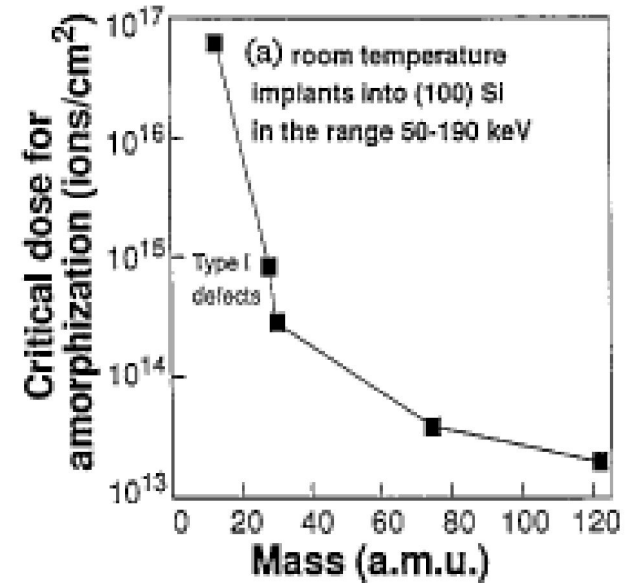
2) Развитие стандартной кремниевой технологии – низкоэнергетичная ионная имплантация.

Емкость DRAM и размер элементов МОП-ПТ. Прогноз Ассоциации Полупроводниковой Промышленности (Semiconductor Industry Association – SIA)

1. Низкоэнергетическая ионная имплантация

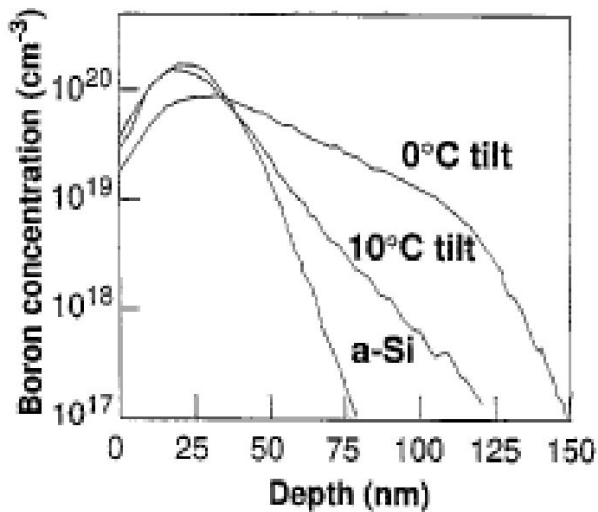
Проблемы:

- эффект каналирования
- дефекты структуры

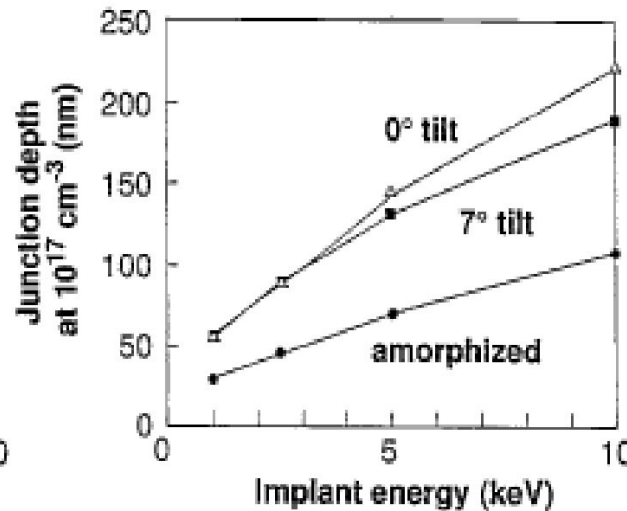


Влияние массы ионов на формирование аморфного слоя в кремнии

(a) 5keV B⁺, 5x10¹⁴ cm⁻², 30°C rotation



(b) B⁺, 5x10¹⁴ cm⁻²

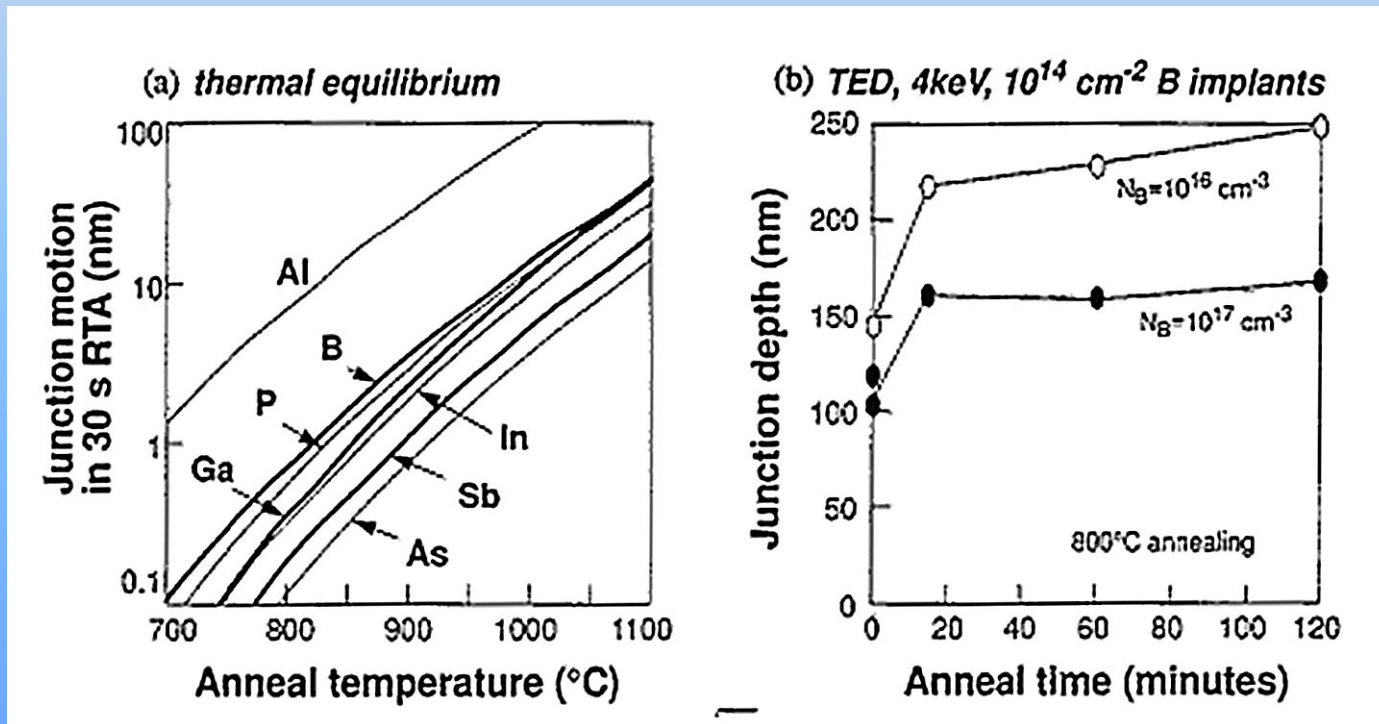


Влияние эффекта каналирования на профили бора

2. Термообработка

Проблемы:

- неравновесная ускоренная диффузия примеси;
- компромисс между максимальной степенью активации примеси, минимальной диффузией примеси, полным отжигом структурных дефектов



Диффузия в кремнии: (а) – условия равновесной диффузии; (б) – неравновесная ускоренная диффузия (TED) атомов бора

Основные характеристики НУД:

- 1) Диффузионная способность легирующей примеси может быть в $10^2 - 10^6$ раз выше, чем равновесная величина;
- 2) Диффузионная способность уменьшается со временем – вплоть до равновесной величины.

Причина явления НУД:

Формирование подвижных комплексов «атом примеси» – «междоузельный атом кремния», за счет вытеснения избыточными собственными междоузельными атомами (СМА) кремния примеси из замещающих положений в решетке.

Диффузионная способность легирующей примеси пропорциональна концентрации СМА кремния.

Отжиг неаморфизованного слоя

I-V-пары → кластеры дефектов (междоузельного типа) → {311}-дефекты → СМА.

Время отжига {311}-дефектов: 950 °С – десятки секунд; 800 °С – десятки минут.

Отжиг аморфного кремния

Полная рекристаллизация a-Si от границы раздела a-Si/c-Si к поверхности происходит при 550 °С.

Область под границей раздела a-Si/c-Si – вторичные дефекты структуры (дислокационные петли (ДП) и {311}-дефекты).

700 °С: ДП + {311}-дефекты.

800 °С: доминирующие дефекты – ДП.

Стабильность ДП при 900 °С – несколько часов, при 1050 °С – несколько секунд

Активация примеси

Время активации при быстром термическом отжиге (БТО): 1000 °С – несколько секунд, 800 °С – десятки минут

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ПРИ СОЗДАНИИ МЕЛКОЗАЛЕГАЮЩИХ P-N-ПЕРЕХОДОВ В КРЕМНИИ

1. Скорость набора дозы

Увеличение генерации дефектов, что позволяет получать аморфные слои при меньших дозах имплантации.

Уменьшение слоевого сопротивления.

Увеличение степени активации примеси.

2. Двухступенчатый отжиг

1) 500-600 °С, 30-60 минут – удаление точечных дефектов от границы a-Si/c-Si, рекристаллизация a-Si.

2) 900-1050 °С БТО – активация легирующей примеси.

3. Предварительная аморфизация ионами Si⁺ или Ge⁺

Аморфные слои подавляют каналирование имплантированных ионов легирующих примесей, особенно легких ионов, и как следствие уменьшают глубину залегания имплантационного профиля.

4. Сверхбыстрый нагрев при БТО

Получают переходы с меньшей глубиной залегания и меньшим количеством дефектов. Причина эффекта – энергия активации процесса диффузии легирующей примеси меньше, чем энергия активации для процесса отжига дефектов.

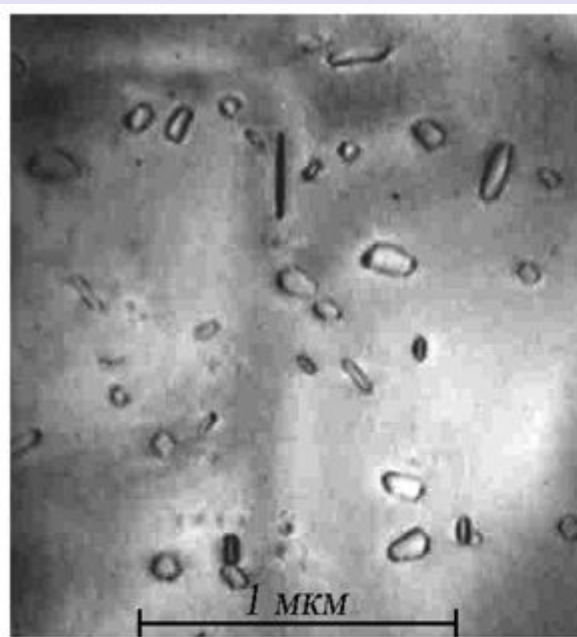
5. Совместная имплантация

А) BF_2 : Использование ионов BF_2^+ позволяет в 49/11 раз использовать большую энергию имплантации по сравнению с ионами B^+ , без увеличения глубины легирования. Аморфизация слоев кремния в процессе имплантации тяжелых ионов BF_2^+ .

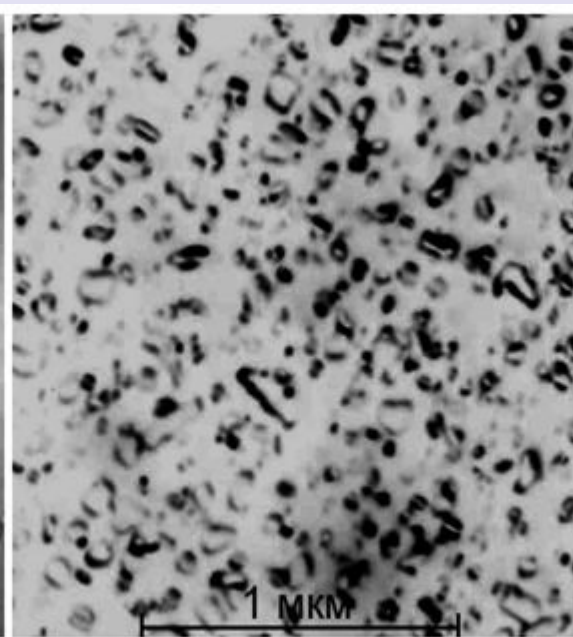
Б) Азот: Уменьшение деградации подзатворного окисла, вызванной присутствием F – уменьшение диффузии атомов бора в затвор.

В) Углерод: Высокая геттерирующая способность углерода к СМА кремния.

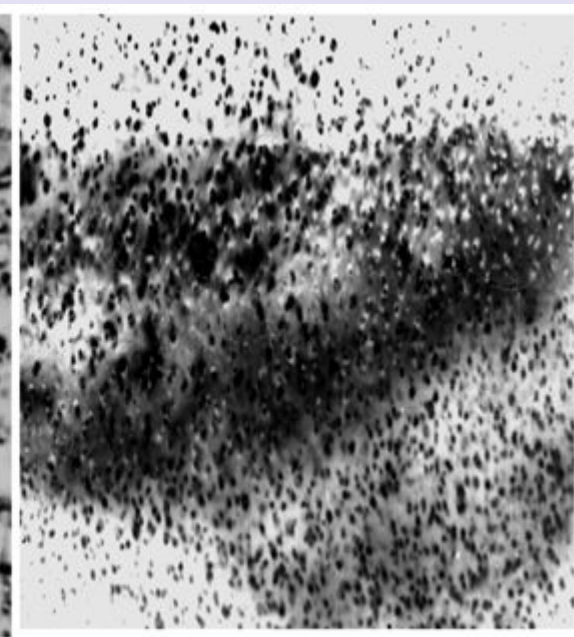
Г) Германий: Эффективная пред-аморфизация кремния, при относительно малых дозах – граница раздела а-с Si является резкой. Компенсация напряжений в кремнии, создаваемых имплантацией ионов бора.



$3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

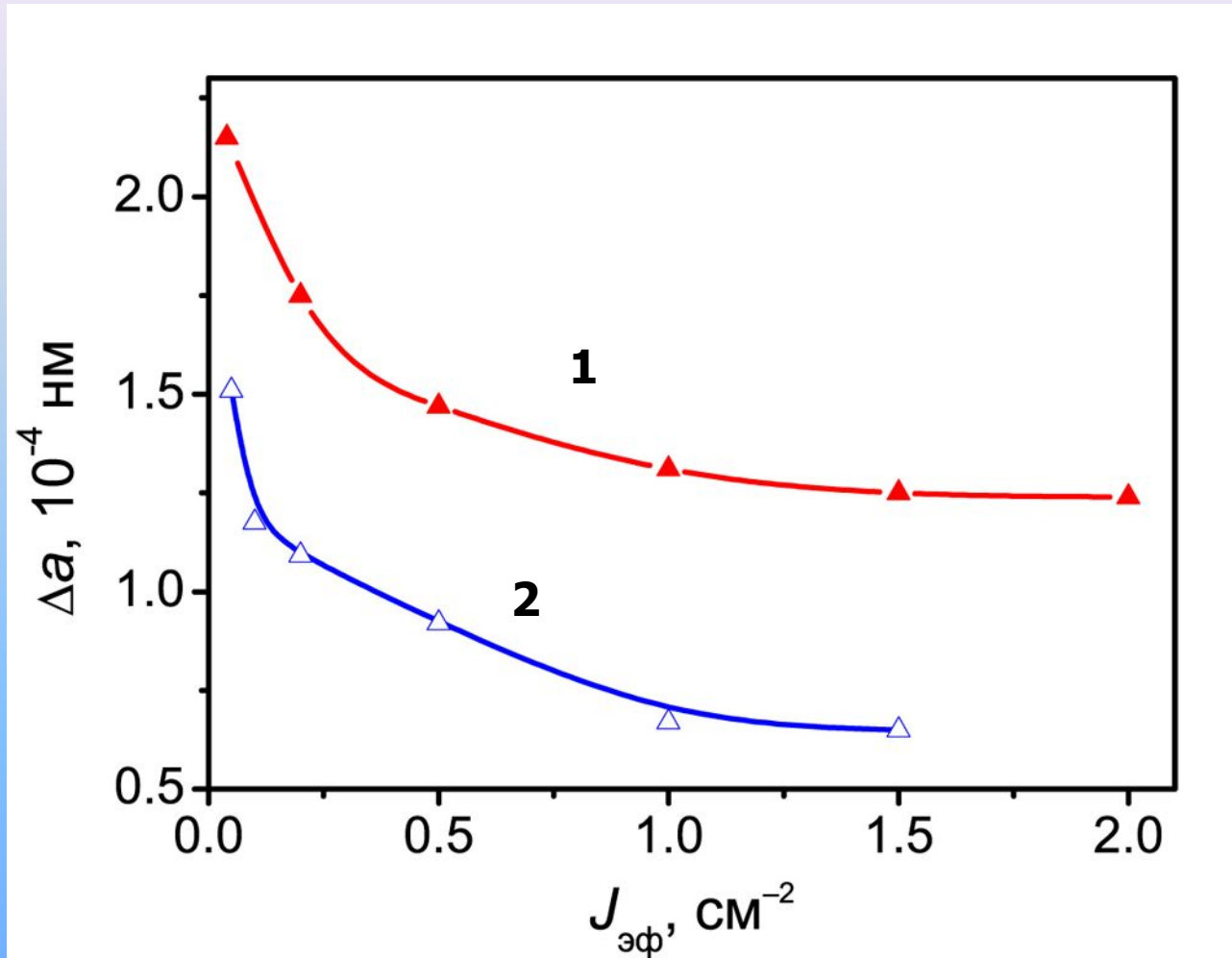


$7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$



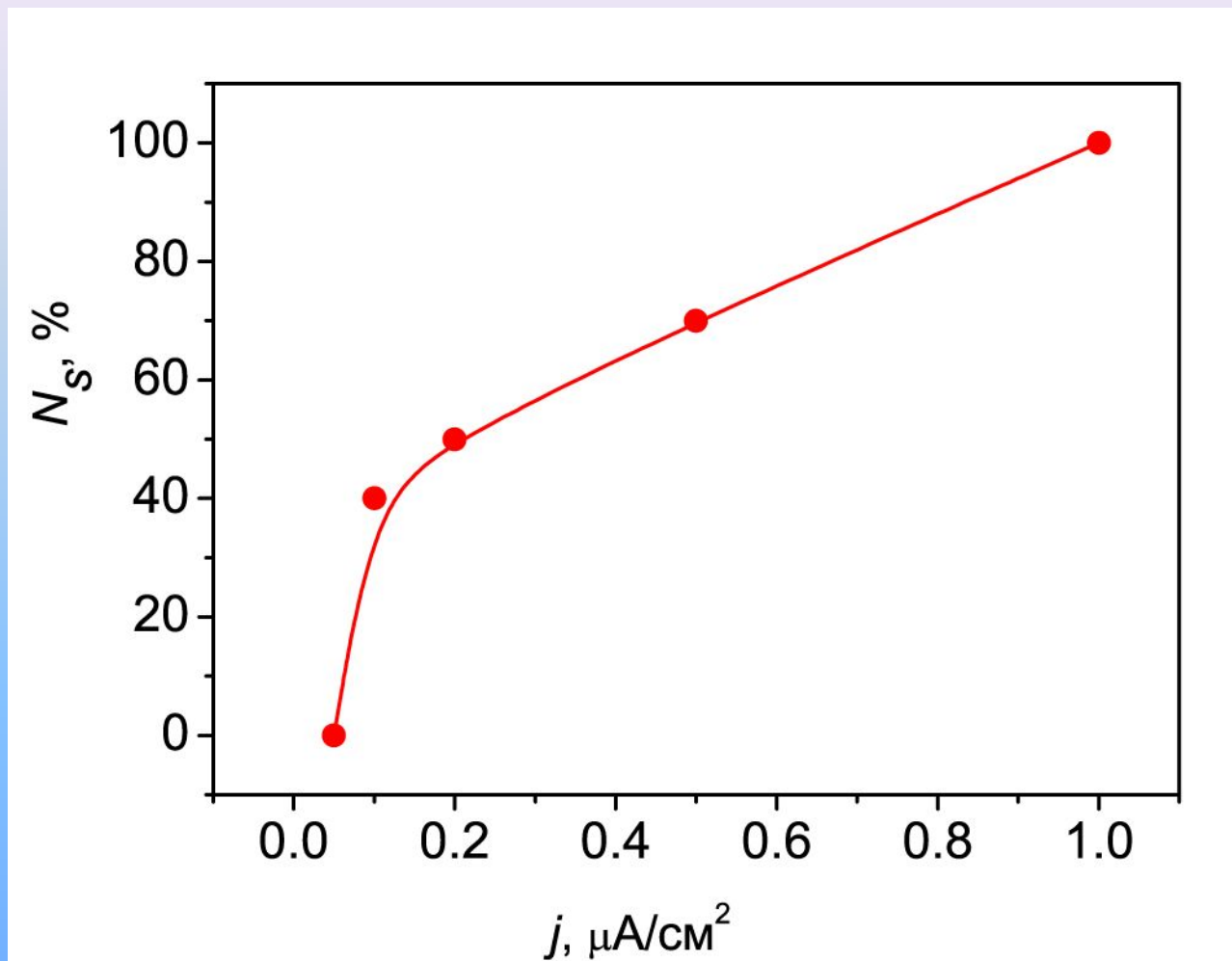
$1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

Электронные микрофотографии кремния,
имплантированного ионами B^+

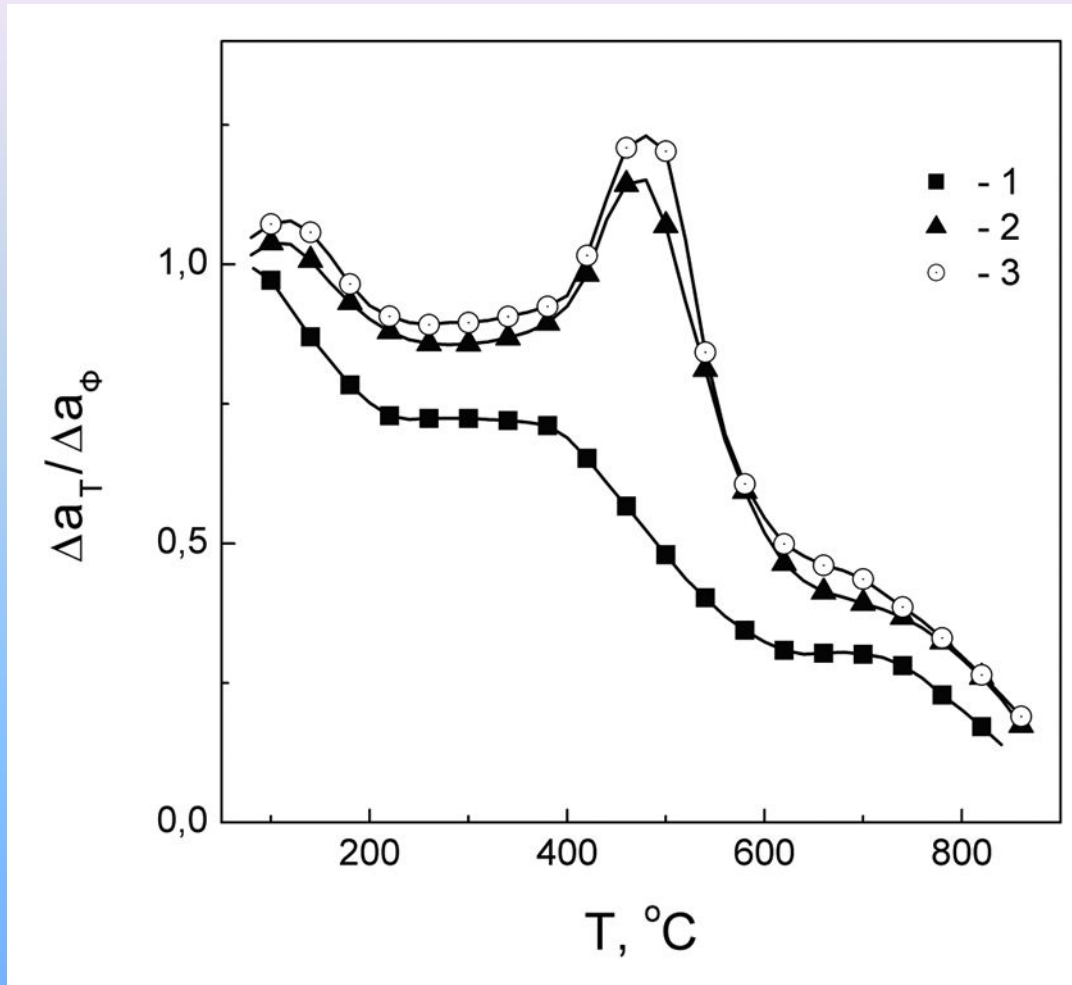


Изменение периода решетки Δa в имплантированном кремнии в зависимости от плотности тока ионов $J_{эф}$:

1 – B^+ , $\Phi = 1,8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$; **2** – C^+ , $\Phi = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$



Доля атомов углерода в узлах решетки кремния в зависимости от плотности ионного тока

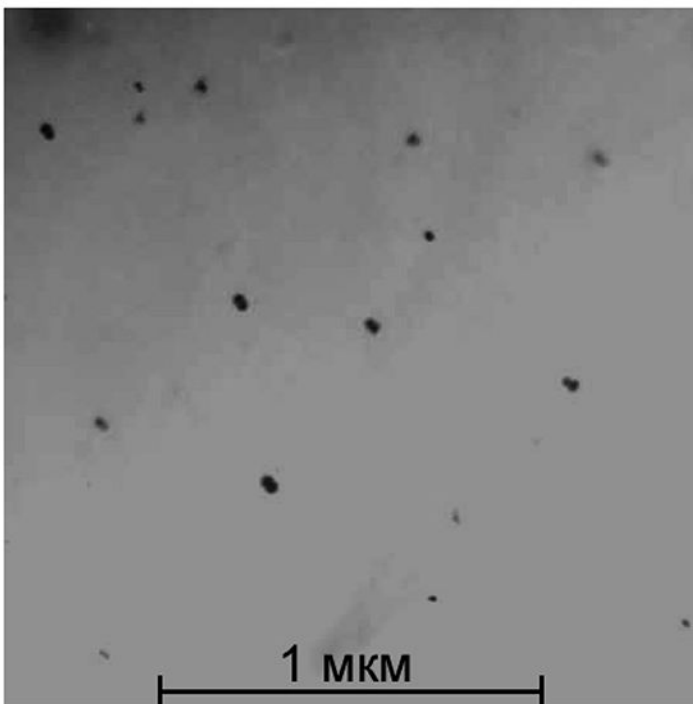


Восстановление периода решетки в кремнии, имплантированном ионами В⁺

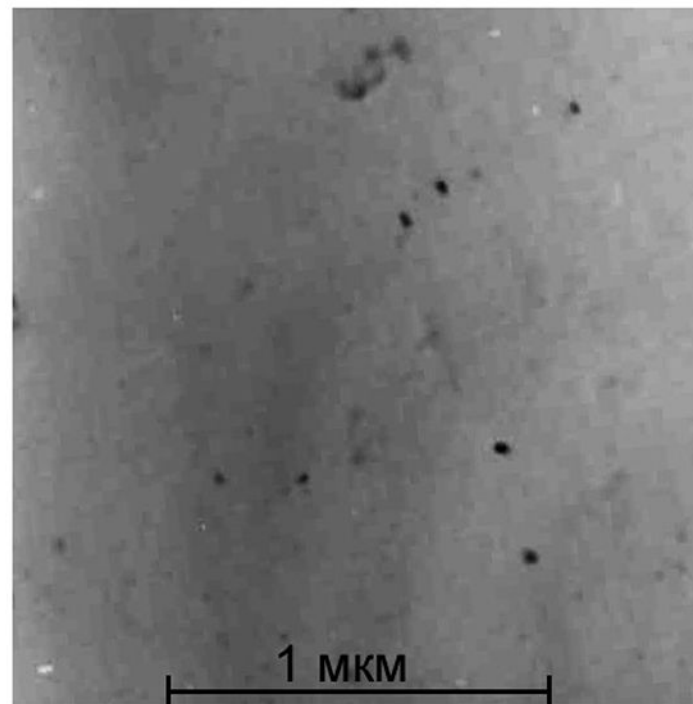
1 – Si:P, $\rho_0 = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; $J_{\text{эф.}} = 0,04 \text{ мкА/см}^2$

2 – Si:P, $\rho_0 = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; $J_{\text{эф.}} = 2 \text{ мкА/см}^2$

3 – Si:B, $\rho_0 = 0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; $J_{\text{эф.}} = 0,2 \text{ мкА/см}^2$

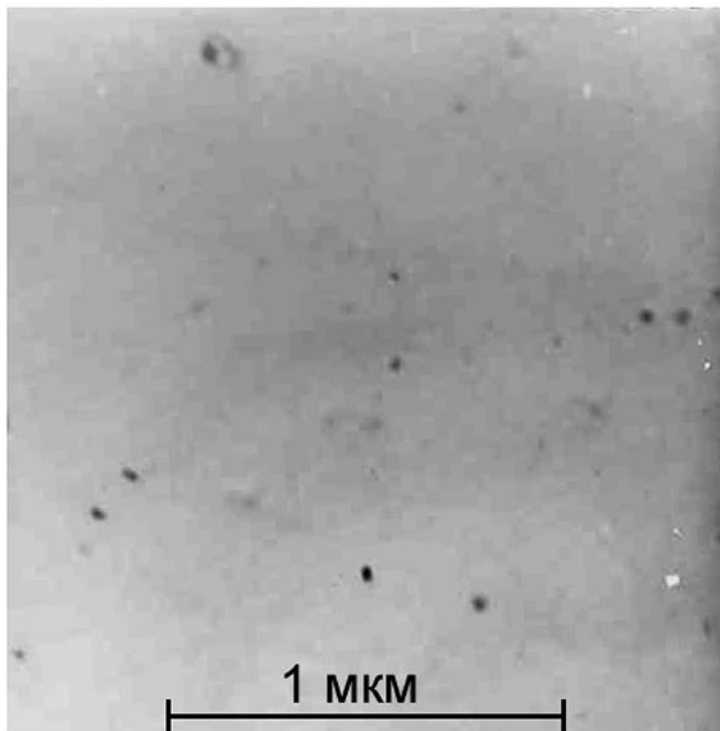


а

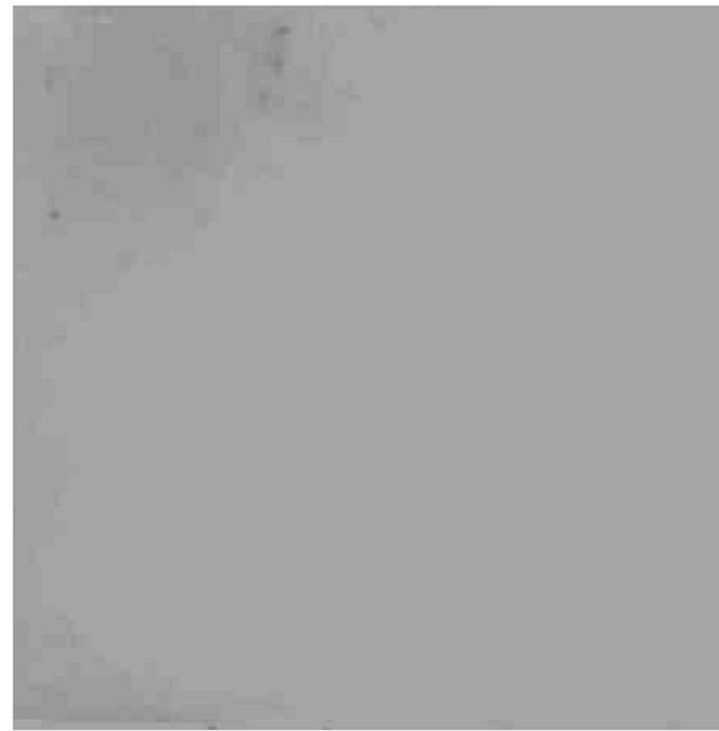


б

Микрофотографии кремния, имплантированного ионами C^+
 $\Phi = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, сплошной пучок. Плотности тока ионов
 $J = 0,05 \text{ мкА/см}^2$ (**а**) и $J = 2,0 \text{ мкА/см}^2$ (**б**)

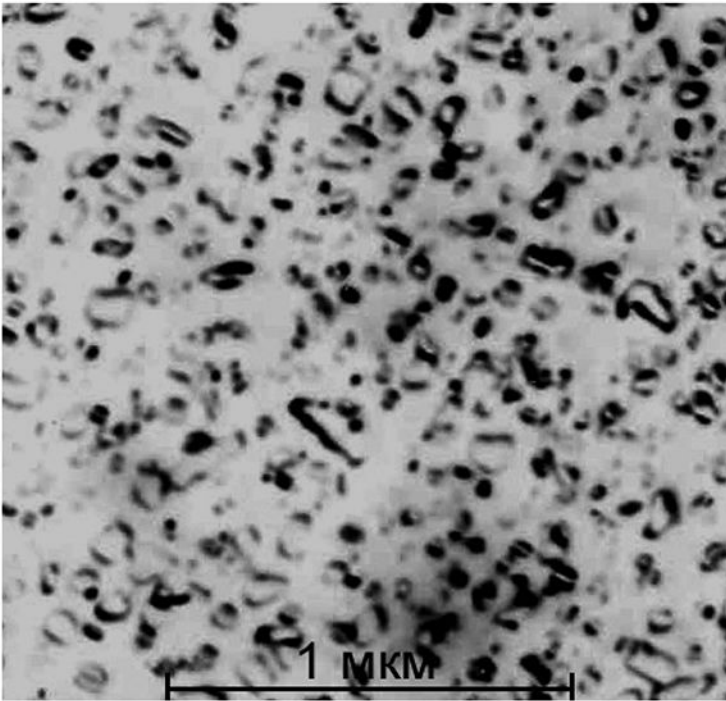


а

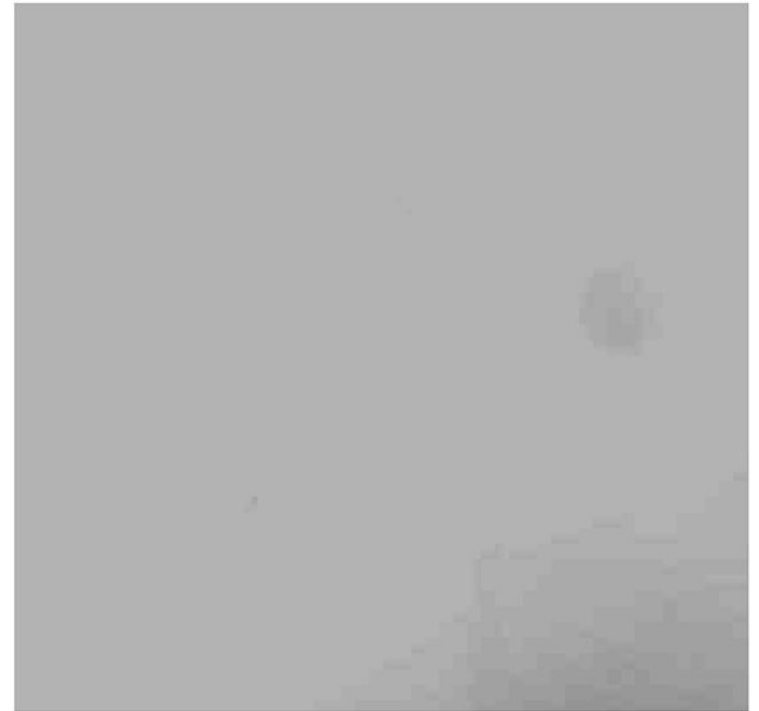


б

Микрофотографии кремния, имплантированного ионами C^+
 $\Phi = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, сканирующий пучок. Плотности тока ионов:
 $J_{\text{эф.}} = 0,05 \text{ мкА/см}^2$ (**а**) и $J_{\text{эф.}} = 1,5 \text{ мкА/см}^2$ (**б**)



а

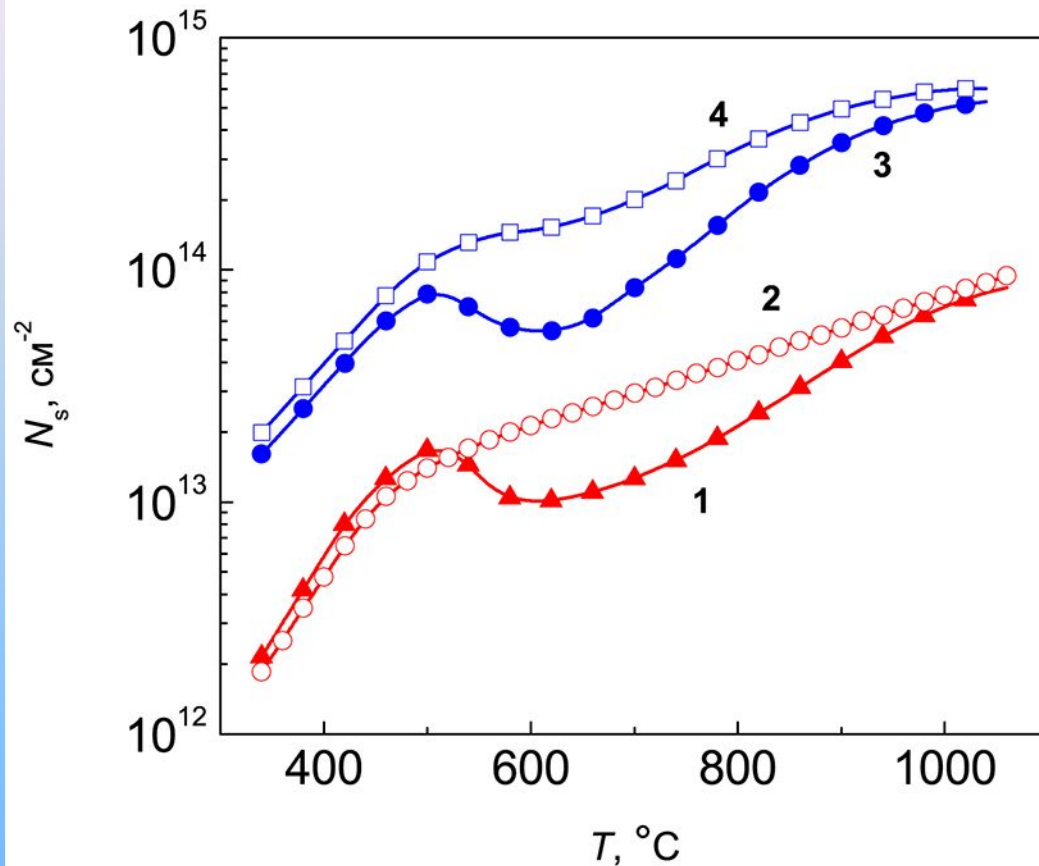


б

Микрофотографии кремния, имплантированного ионами:

$$\text{B}^+, \Phi_{\text{B}} = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}, J_{\text{эф.}} = 1,5 \text{ мкА/см}^2 \text{ (а)}$$

$$\text{C}^+, \text{B}^+, \Phi_{\text{C,B}} = 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}, J_{\text{эф.}} = 1,5 \text{ мкА/см}^2 \text{ (б)}$$



Кривые электрической активации имплантированного бора в слоях кремния:
легированных углеродом:

- 1 – контрольный образец, доза ионов B^+ $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$;
- 2 – доза ионов C^+ $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$, доза ионов B^+ $1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$;

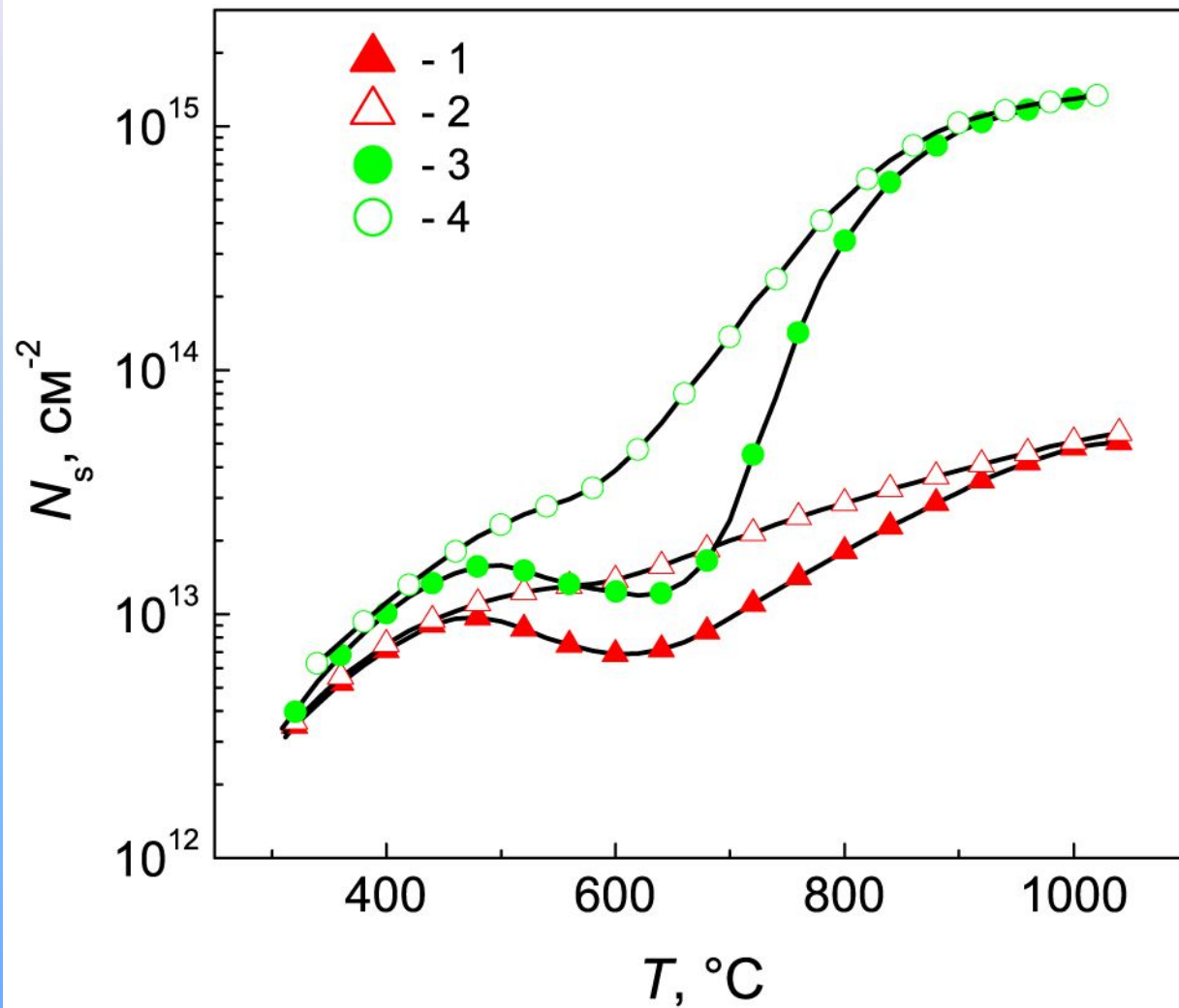
легированных германием:

- 3 – контрольный образец, доза ионов B^+ $1,3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$;
- 4 – доза ионов Ge^+ $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, отжиг, доза ионов B^+ $1,3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$

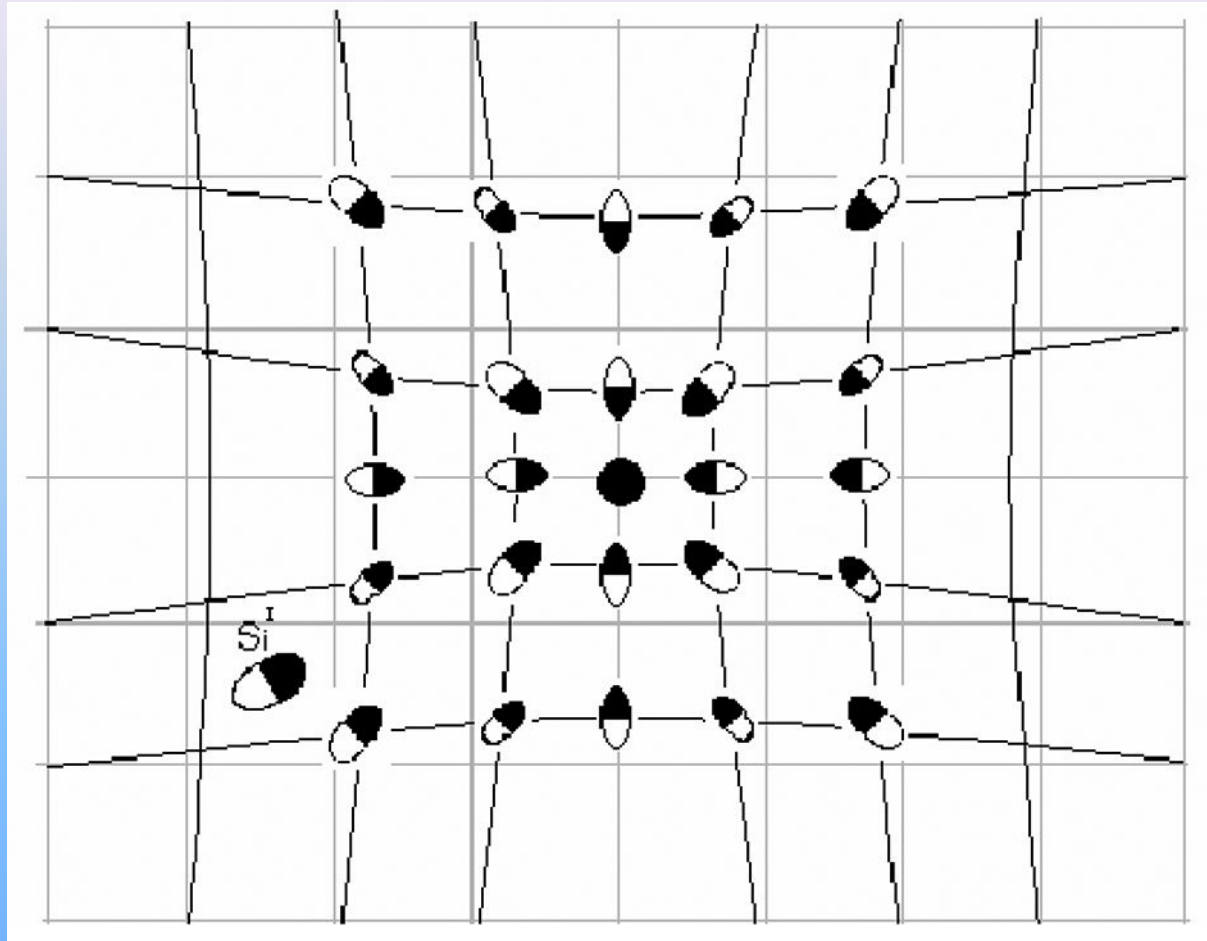


Концентрация бора, вытесненного из узлов решетки Si,
легированного В ($\rho_0 = 0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$)
при имплантации ионов бора

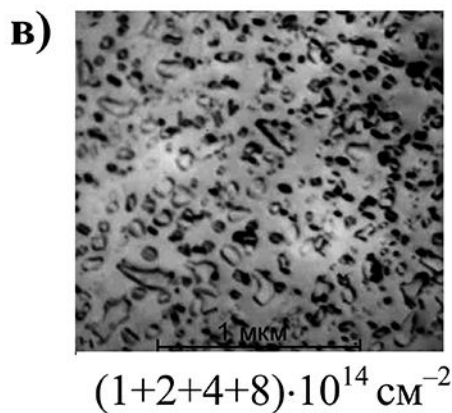
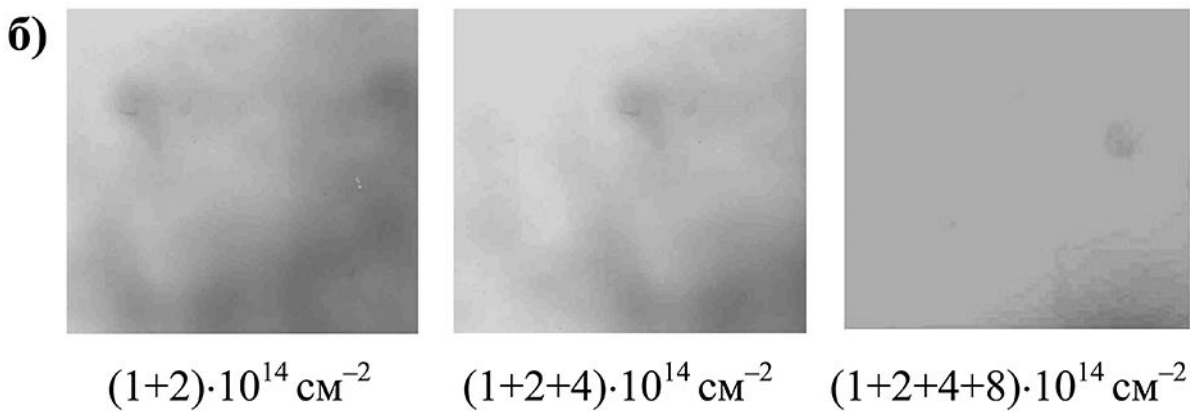
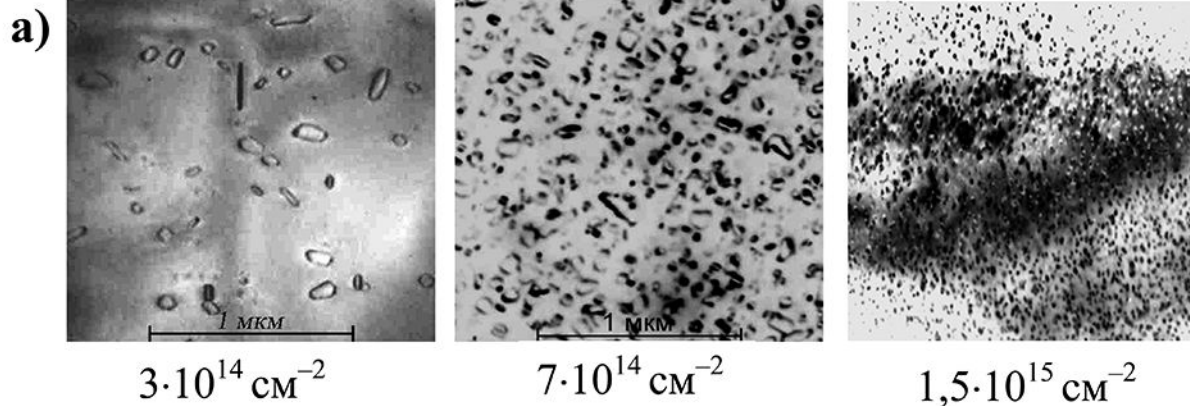
| | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| $J_{\text{эф}}, \text{ мкА/см}^2$ | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 |
| $C_i^S, \text{ см}^{-3}$ | $2,1 \cdot 10^{19}$ | $1,4 \cdot 10^{19}$ | $6,7 \cdot 10^{18}$ | $8,6 \cdot 10^{17}$ | $3 \cdot 10^{17}$ |



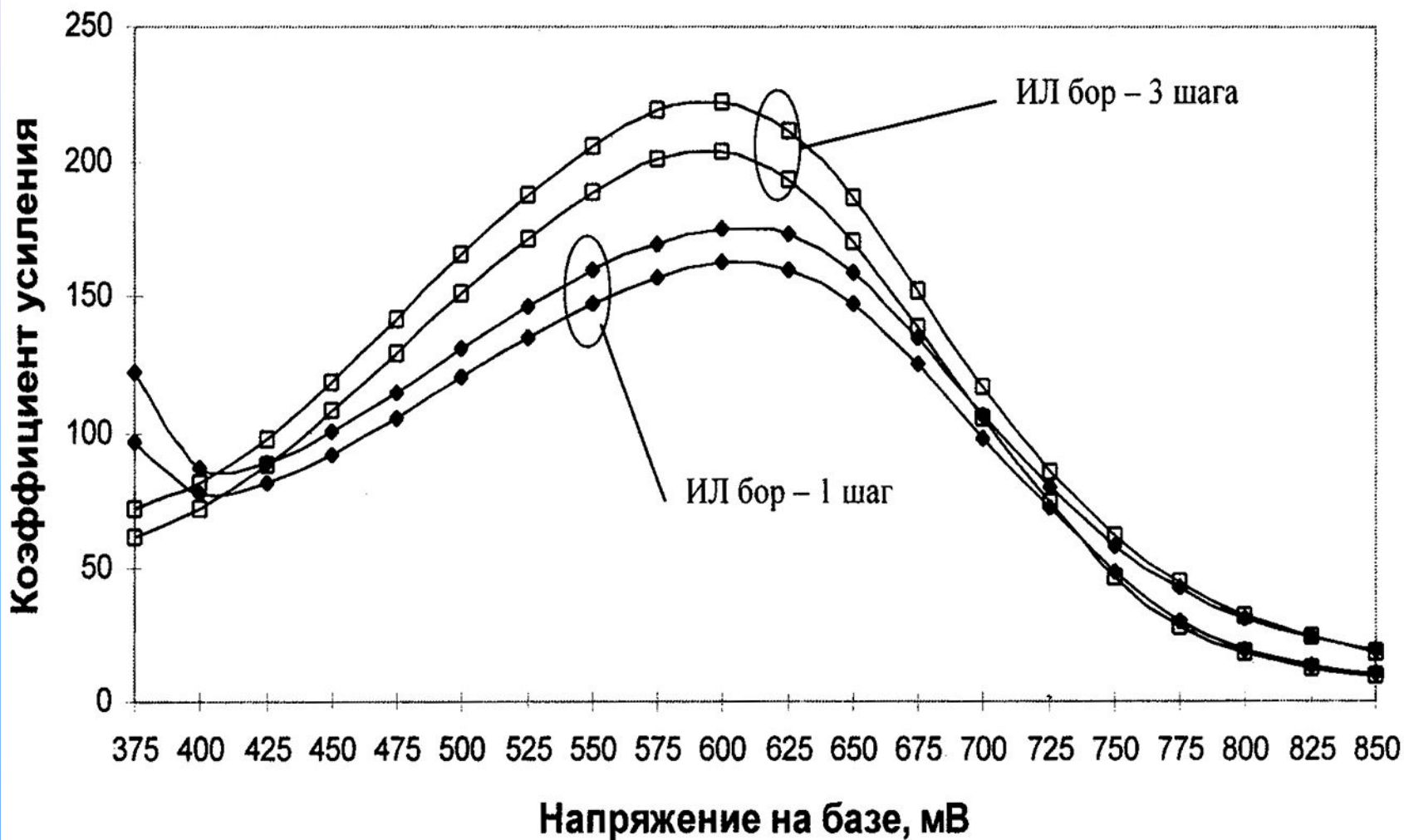
Электрическая активация имплантированных атомов бора (**1**, **2**) и фосфора (**3**, **4**); **2**, **4** – отжиг с подсветкой электронами



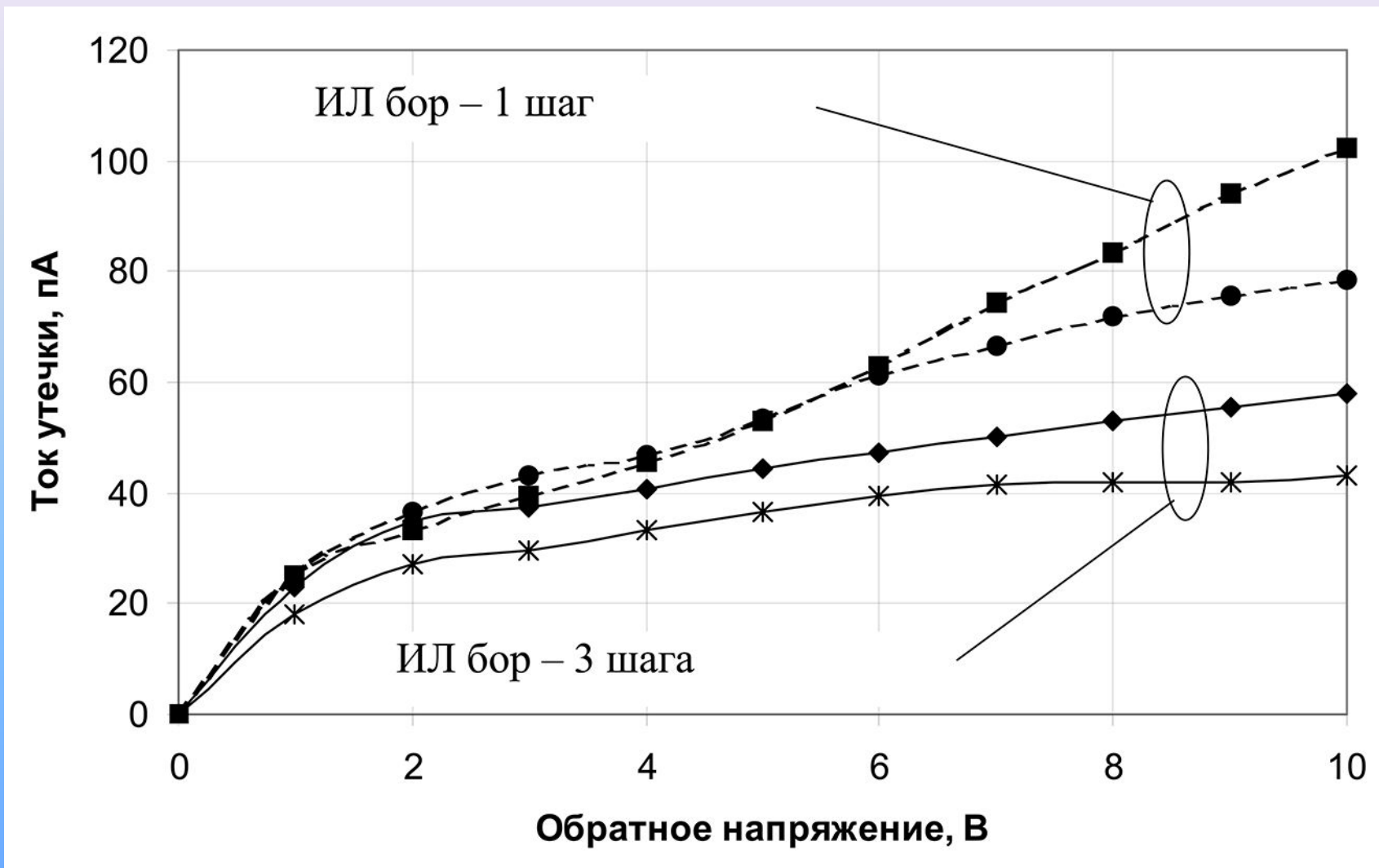
Движение атома Si в кремнии в поле упругих деформаций, создаваемых примесью замещения



Электронные микрофотографии кремния, имплантированного ионами В⁺ (а), имплантированного ионами В⁺ пошаговым методом с плотностью тока ионов $J_{\text{эф}} = 1,5 \text{ мкА/см}^2$ (б), пошаговым методом при $J_{\text{эф}} = 0,05 \text{ мкА/см}^2$ для последнего шага (в)

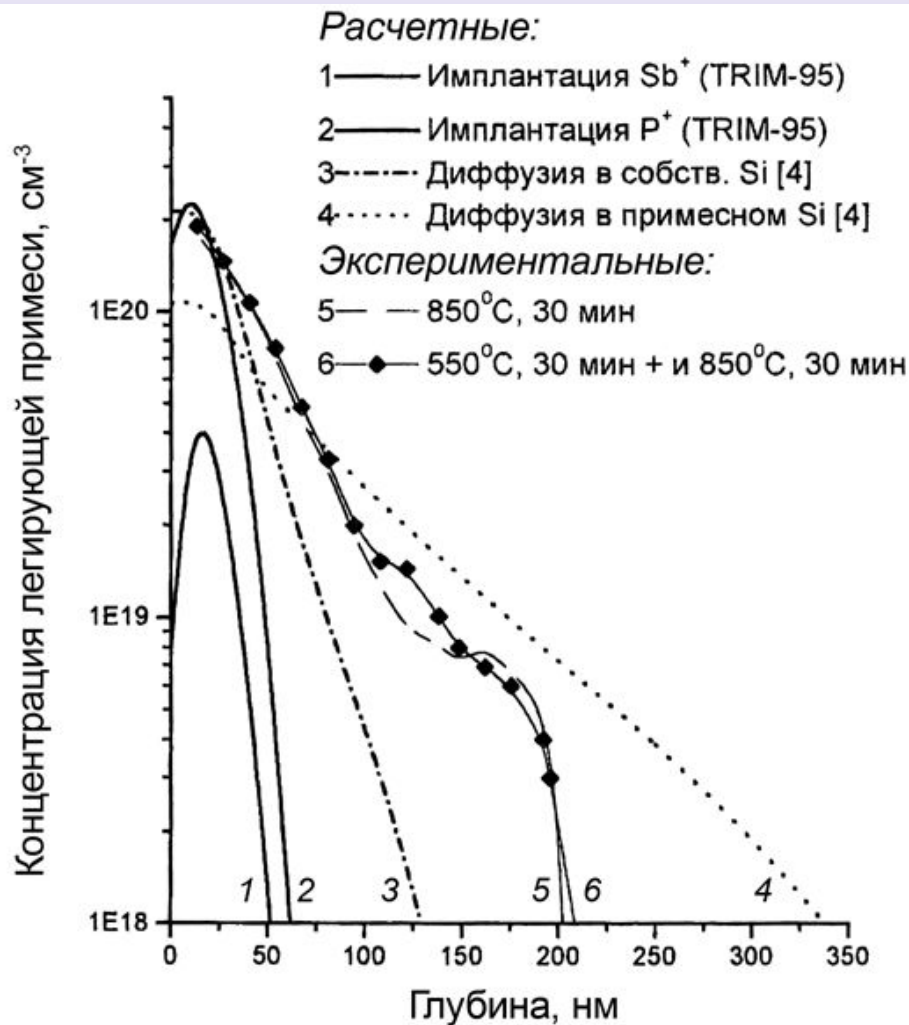


Зависимость коэффициента усиления горизонтальных транзисторов от напряжения на базе для опытной (3 шага) и текущей (1 шаг) партии



Обратная ветвь вольт-амперной характеристики входных планарных диодов на опытной (3 шага) и текущей (1 шаг) пластинах

ДВОЙНАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ СУРЬМЫ И ФОСФОРА КАК МЕТОД СОЗДАНИЯ ТОНКИХ n⁺ СЛОЕВ В КРЕМНИИ



Имплантация:

ионы Sb⁺: 60 кэВ, 1.25×10^{14} см⁻²;

ионы P⁺: 20 кэВ, 8.13×10^{14} см⁻².

Отжиг:

550 °C, 30 мин.; 850 °C, 30 мин.

В исследованиях для предварительной аморфизации использовали имплантацию сурьмы:

А) ионы сурьмы имеют большую массу;

Б) сурьма легирующая донорная примесь;

В) имплантация сурьмы технологически хорошо отработана;

Г) одновременное введение сурьмы и фосфора должно приводить к компенсации напряжений.

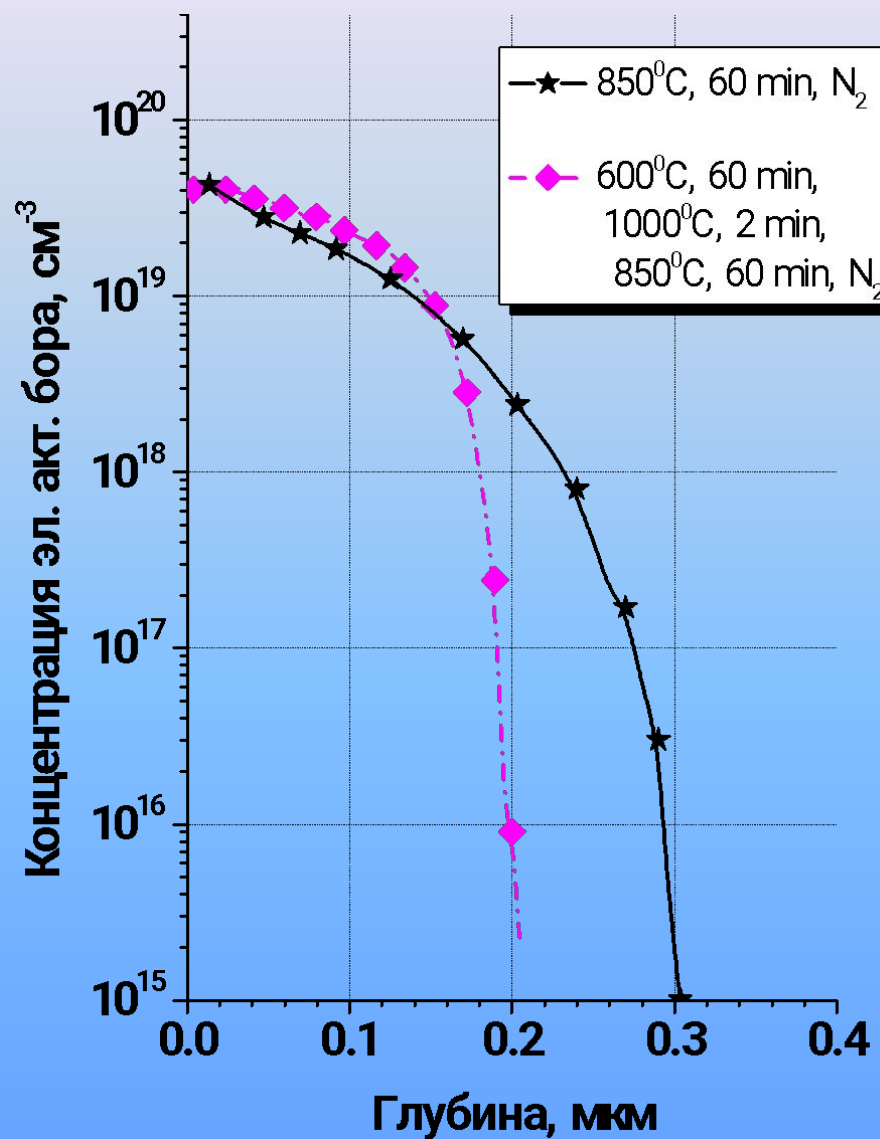
РЕЗУЛЬТАТЫ:

1) Очень резкий n⁺-р-переход с глубиной залегания 210 нм.

2) Не обнаружено вторичных дефектов структуры.

Профили распределения электрически активной примеси после имплантации и термообработки в (100) кремнии (КДБ-10)

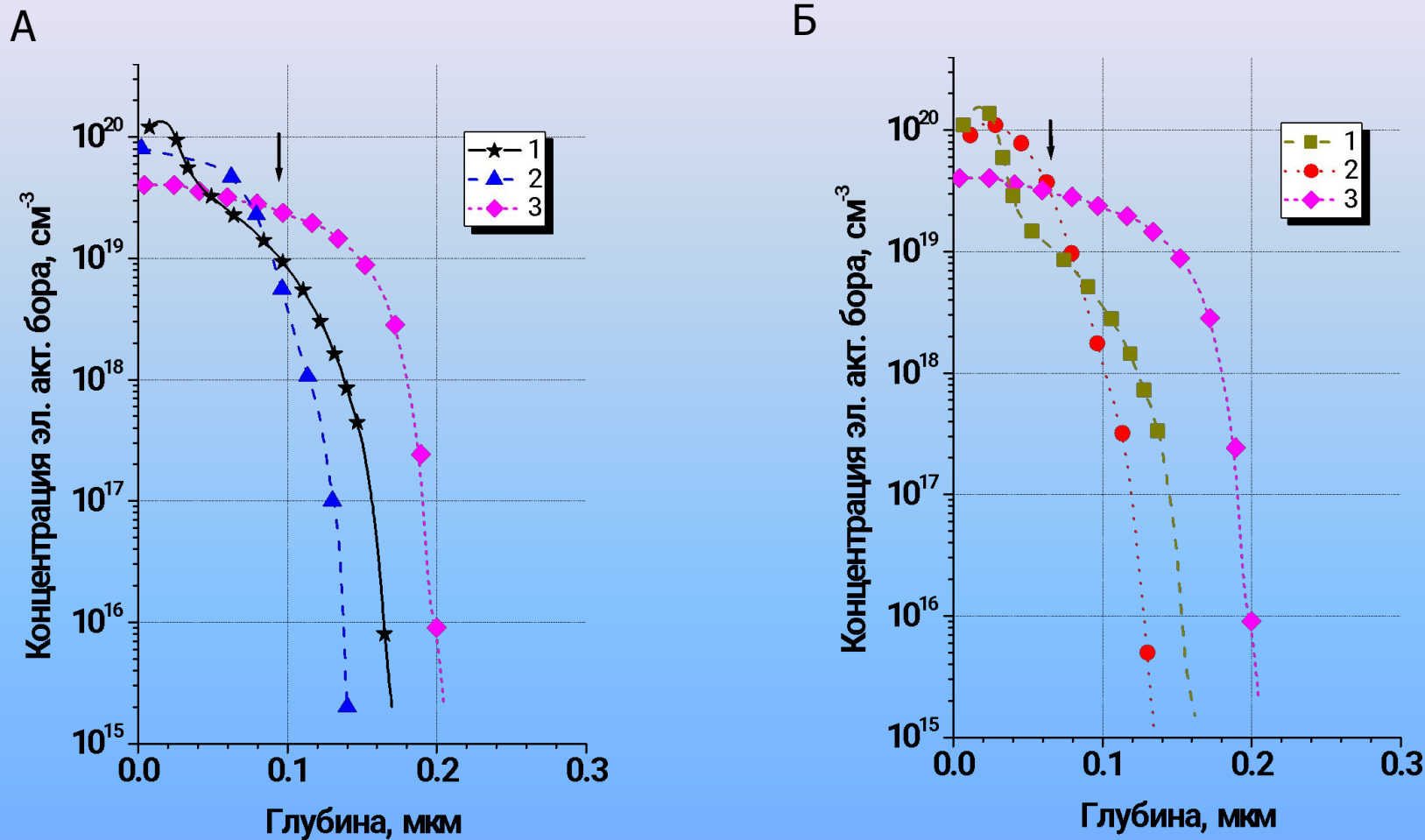
ФОРМИРОВАНИЕ МЕЛКОЗАЛЕГАЮЩИХ p^+ - n – ПЕРЕХОДОВ В КРЕМНИИ



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ

Профили электрически активного бора в p^+ - n переходах, сформированных имплантацией ионов BF_2^+ (20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) и последующего термического отжига.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ С ИОНАМИ BF_2^+ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ УГЛЕРОДА



Профили электрически активного бора в p^+ - n переходах.

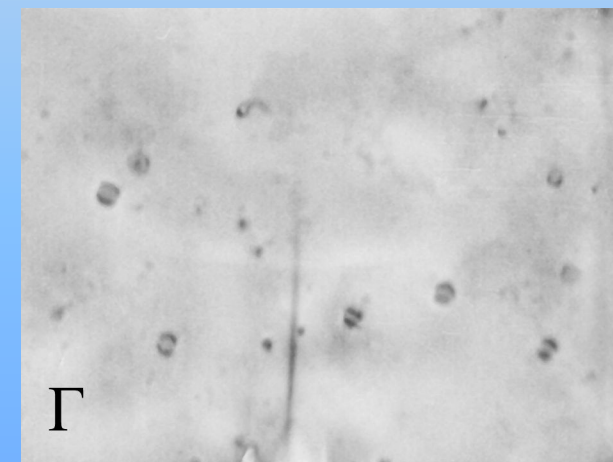
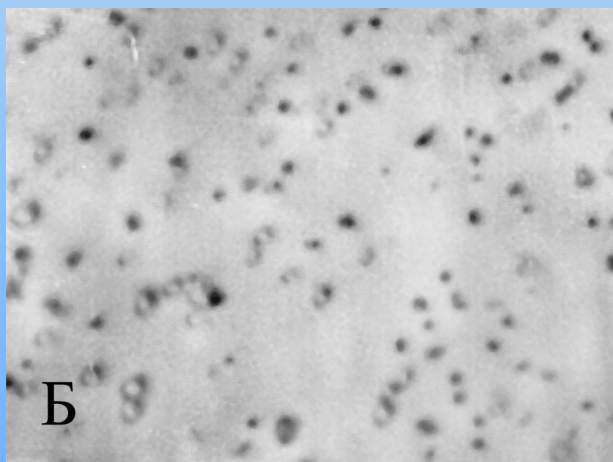
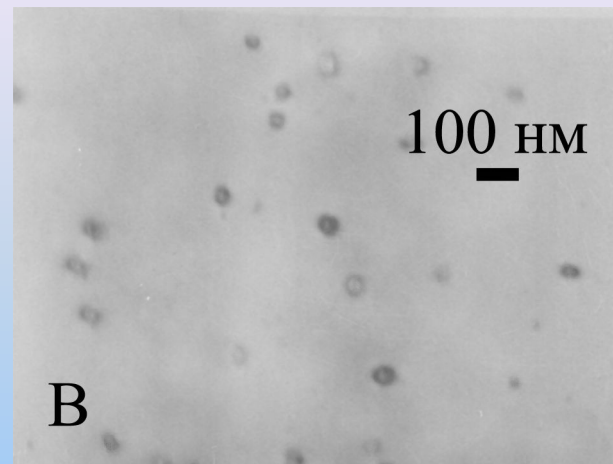
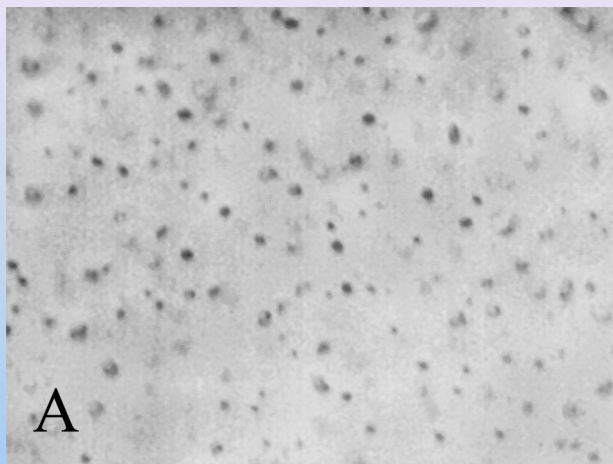
Имплантация: BF_2^+ (20 кэВ , $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) (кривая 3); C^+ (А - 30 кэВ , $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, Б - 20 кэВ , $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) (кривые 1-2) и последующего термического отжига: 1) $850 \text{ }^\circ\text{C}$, 60 минут, N_2 (кривая 1). 2) $600 \text{ }^\circ\text{C}$, 60 минут; $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 минуты; $850 \text{ }^\circ\text{C}$, 60 минут; N_2 (кривые 2-3).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ С ИОНАМИ BF_2^+ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ УГЛЕРОДА

Значения слоевого сопротивления и слоевой концентрации в p^+ - n переходах в зависимости от режимов их формирования

| № п/п | Режимы обработки образцов | | | Слоевое сопротивление, R_s [Ом/□] | Слоевая концентрация, N_s [см^{-2}] |
|-------|---|---|--|-------------------------------------|--|
| | Имплантация ионов BF_2^+ | Имплантация ионов C^+ | Термообработка | | |
| 1 | 20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | – | 850°C, 60 минут | 450 | 3.81×10^{14} |
| 2 | 20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | – | 600°C, 60 минут, 1000°C, 2 минуты, 850°C, 60 минут | 421 | 4.2×10^{14} |
| 3 | 20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | 20 кэВ, $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | 850°C, 60 минут | 448 | 4.38×10^{14} |
| 4 | 20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | 20 кэВ, $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | 600°C, 60 минут, 1000°C, 2 минуты, 850°C, 60 минут | 400 | 4.95×10^{14} |
| 5 | 20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | 30 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | 850°C, 60 минут | 456 | 4.59×10^{14} |
| 6 | 20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | 30 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ | 600°C, 60 минут, 1000°C, 2 минуты, 850°C, 60 минут | 380 | 4.93×10^{14} |

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ С ИОНАМИ BF_2^+ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ УГЛЕРОДА



Светлопольные микрофотографии структуры кремния. Имплантация ионов BF_2^+ (20 кэВ , $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) и C^+ (20 кэВ , $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$) – В, Г. Термообработка: 1) 850 °C – 60 минут, в среде N_2 – А, В. 2) 600 °C – 60 минут, 1000 °C – 2 минуты, 850 °C – 60 минут, в среде N_2 – Б,Г.

УМЕНЬШЕНИЕ НЕРАВНОВЕСНОЙ УСКОРЕННОЙ ДИФФУЗИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ ПРИ СОЗДАНИИ P-N – ПЕРЕХОДОВ

Таким образом, показана принципиальная возможность улучшения структурных и электрофизических свойств формируемых p-n – переходов в кремнии с использованием:

- Предварительных режимов термообработки;
- Совместной имплантации примеси, замедляющей неравновесную ускоренную диффузию легирующей примеси.

Перспективные направления исследований:

- Исследовать процессы дефектообразования и диффузии при низкоэнергетичной имплантации легирующей примеси и последующей термообработке
- Исследовать влияние режимов предварительной аморфизации слоев кремния при создании мелкозалегающих p-n-переходов
- Разработать и исследовать режимы дополнительных низкотемпературных обработок с целью снизить неравновесную ускоренную диффузию легирующей примеси при отжиге имплантированных слоев кремния
- Исследовать влияние **БТО** на процесс дефектообразования, диффузию и активацию легирующей примеси в кремнии