

# Дефекто-примесная инженерия в ионно-имплантированном кремнии

Комаров Фадей Фадеевич  
Мильчанин Олег Владимирович

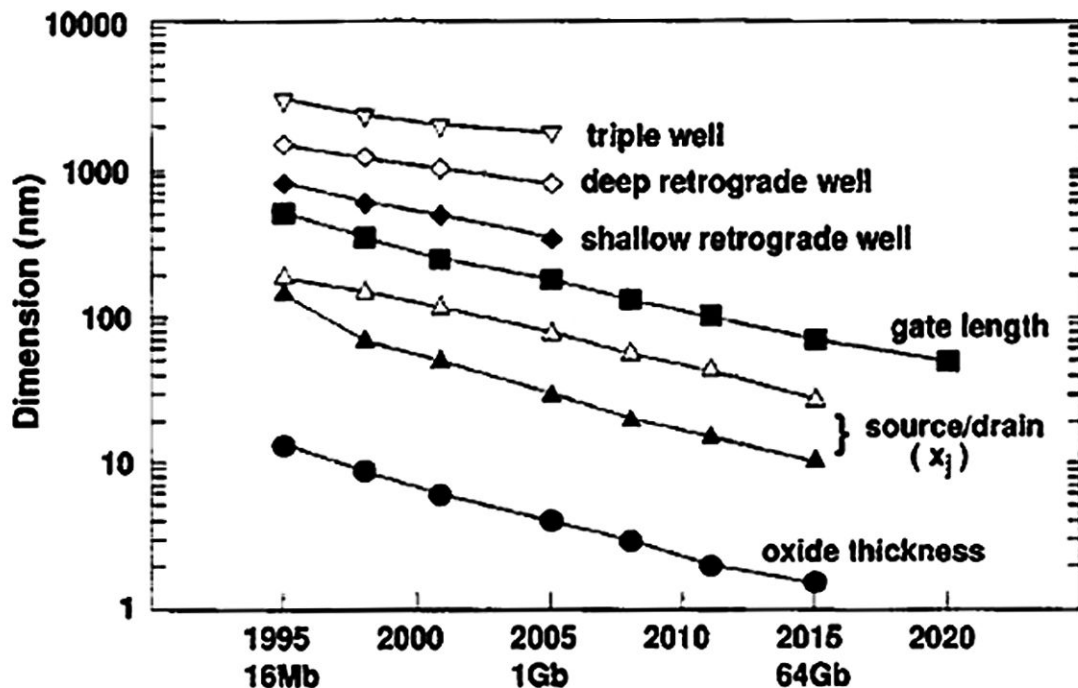
**Цель:** исследовать процессы электрической активации и диффузии атомов легирующей примеси, формирования и эволюции вторичных дефектов структуры в тонких слоях кремния при низкоэнергетичной имплантации ионов и последующей термообработке, а также при использовании подходов, позволяющих снижать неравновесную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

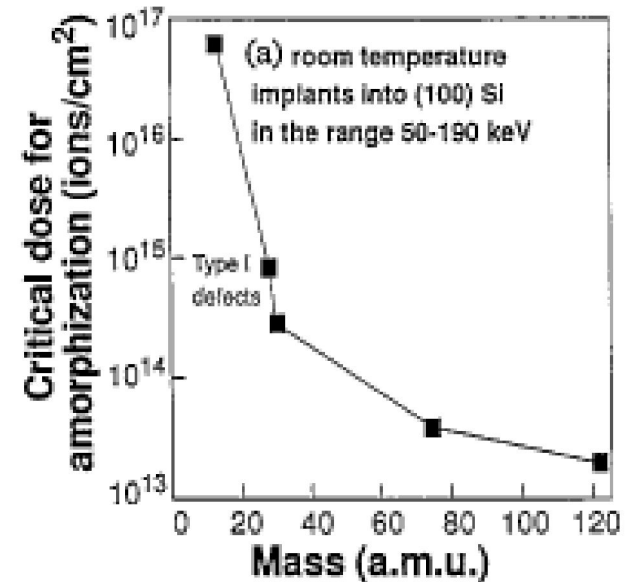
2) Развитие стандартной кремниевой технологии – низкоэнергетичная ионная имплантация.

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

## 1. Низкоэнергетическая ионная имплантация

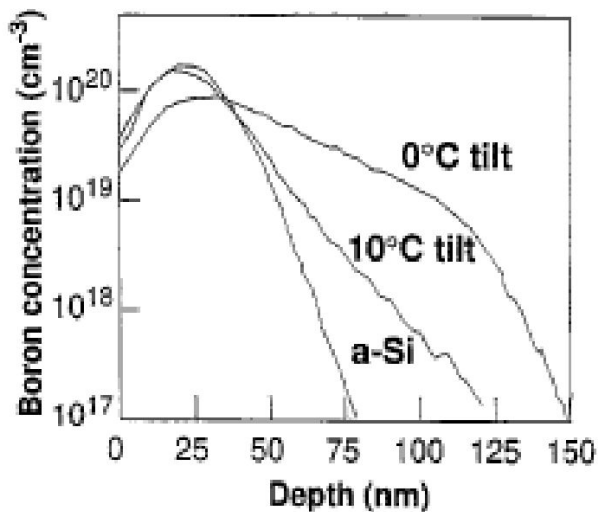
### Проблемы:

- эффект каналирования
- дефекты структуры

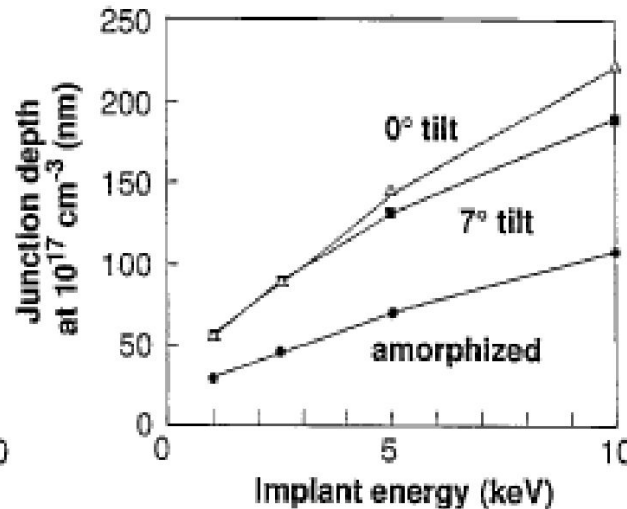


Влияние массы ионов на формирование аморфного слоя в кремнии

(a) 5keV B<sup>+</sup>, 5x10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup>, 30°C rotation



(b) B<sup>+</sup>, 5x10<sup>14</sup> cm<sup>-2</sup>

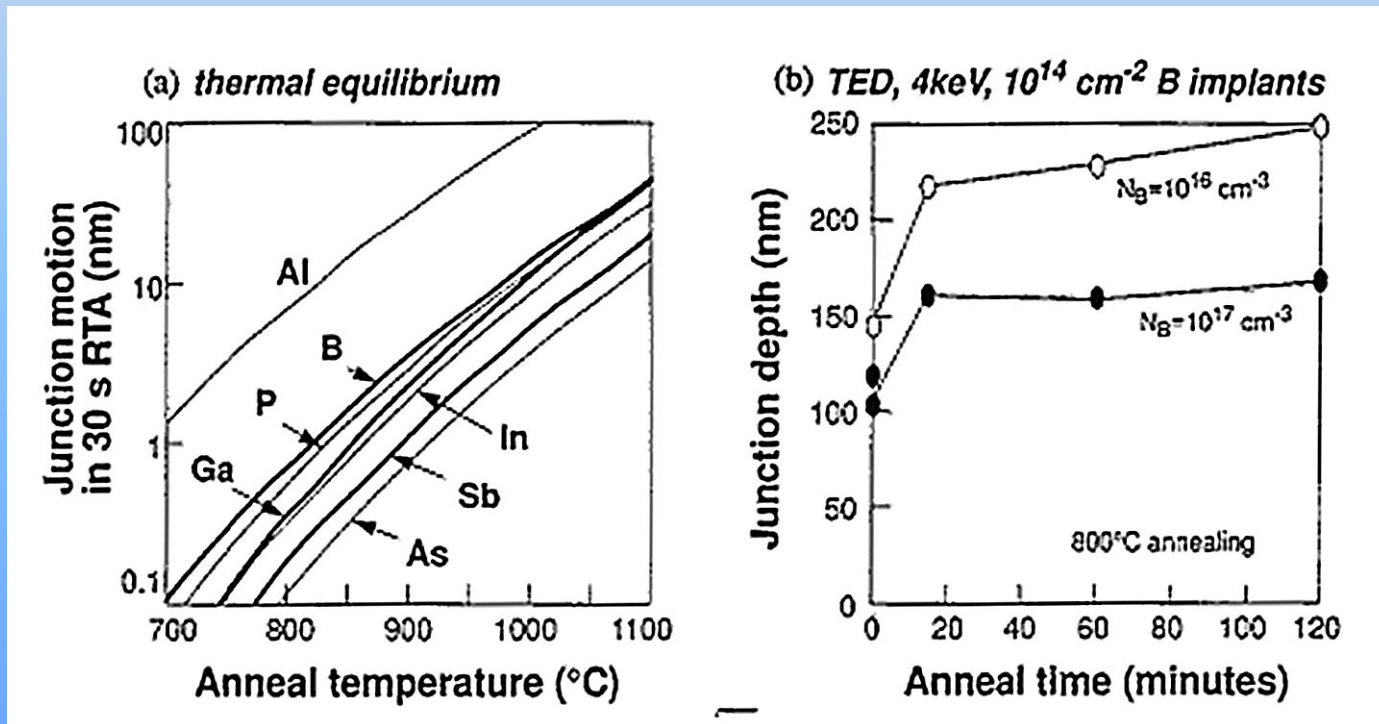


Влияние эффекта каналирования на профили бора

## 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; (b) – 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 °C – десятки секунд; 800 °C – десятки минут.

## Отжиг аморфного кремния

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

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

700 °C: ДП + {311}-дефекты.

800 °C: доминирующие дефекты – ДП.

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

## Активация примеси

Время активации при быстром термическом отжиге (БТО): 1000 °C – несколько секунд, 800 °C – 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<sup>+</sup> или Ge<sup>+</sup>

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

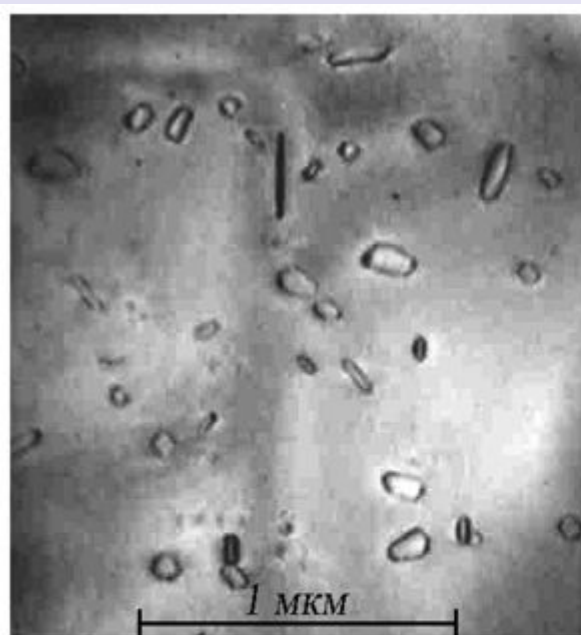
**А)  $\text{BF}_2$ :** Использование ионов  $\text{BF}_2^+$  позволяет в 49/11 раз использовать большую энергию имплантации по сравнению с ионами  $\text{B}^+$ , без увеличения глубины легирования. Аморфизация слоев кремния в процессе имплантации тяжелых ионов  $\text{BF}_2^+$ .

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

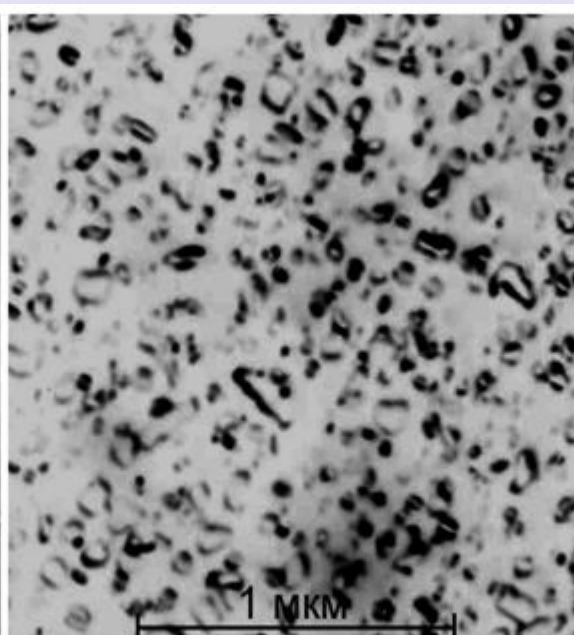
**В) Углерод:** Высокая геттерирующая способность углерода к СМА кремния.

**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.

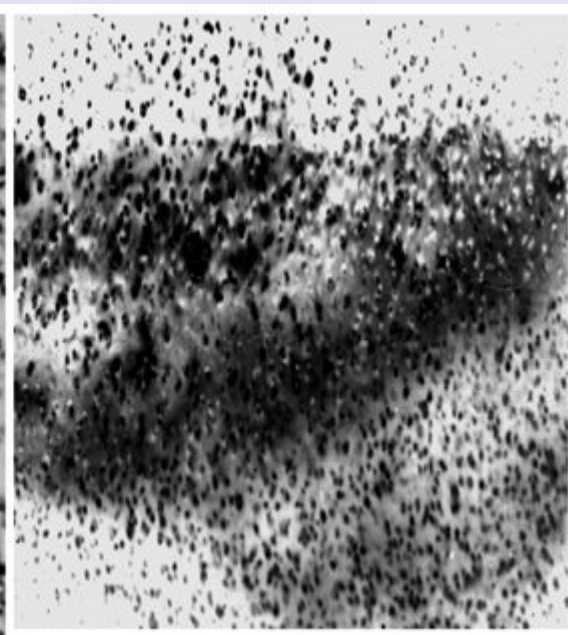




$3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$

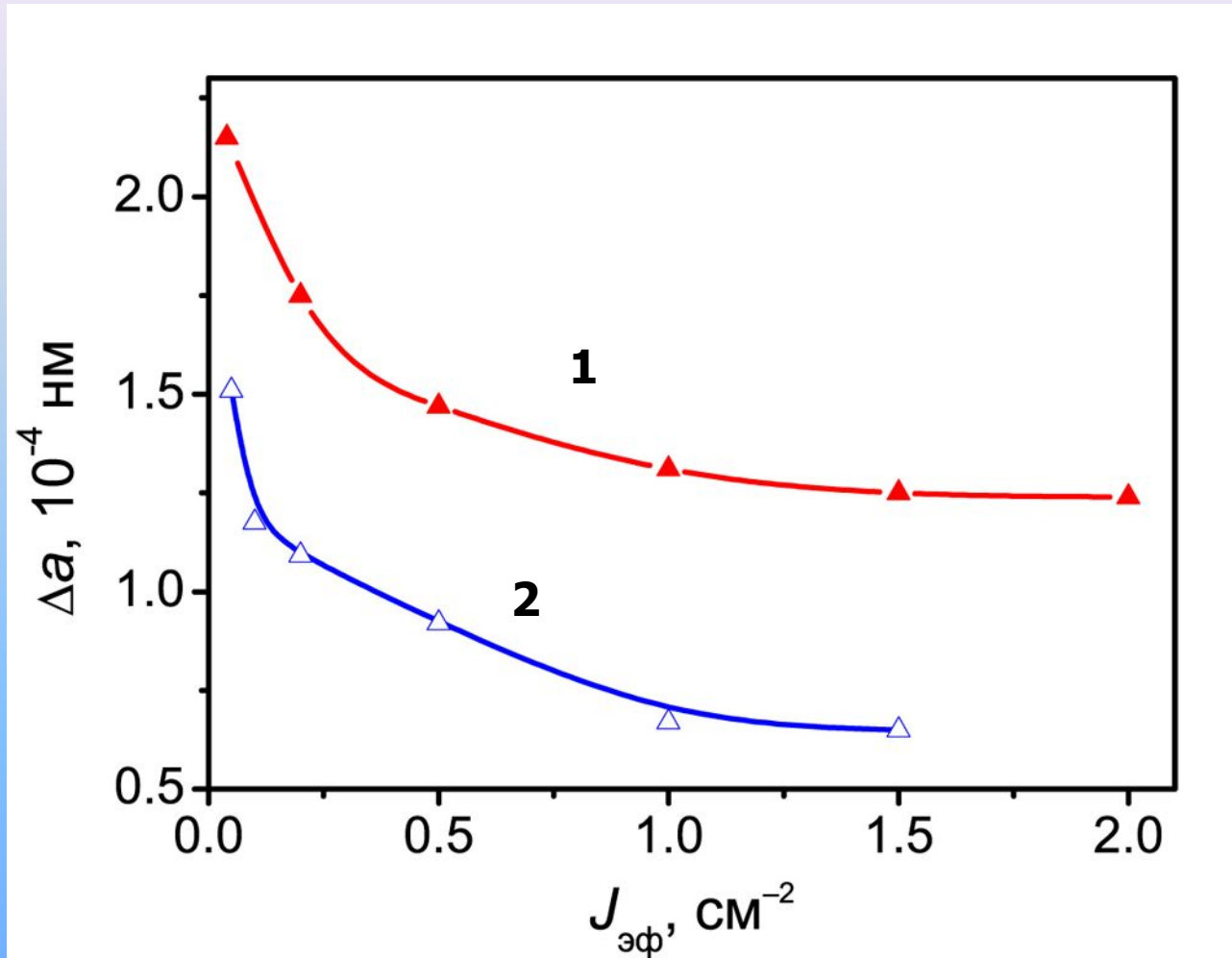


$7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$



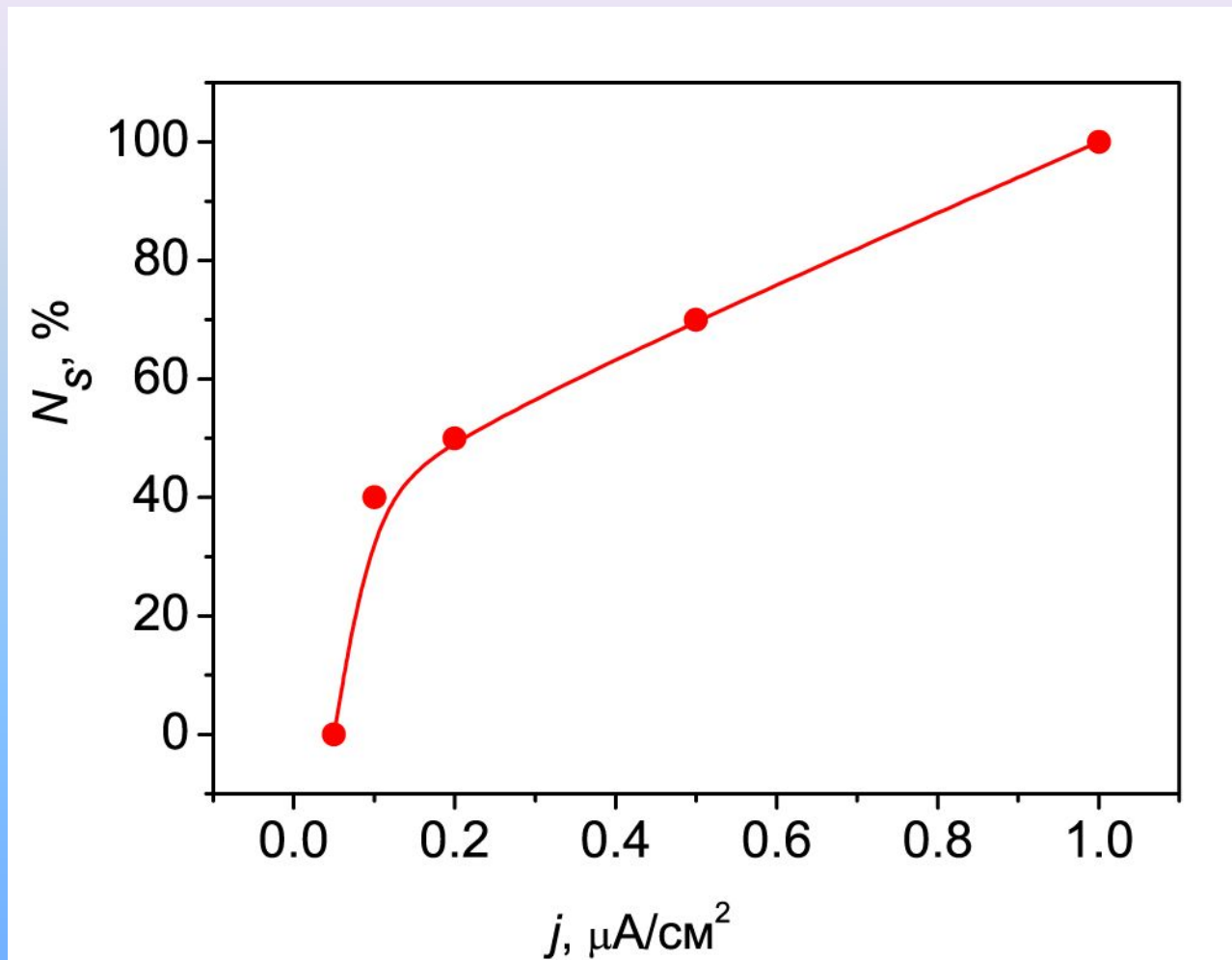
$1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$

Электронные микрофотографии кремния,  
имплантированного ионами  $B^+$

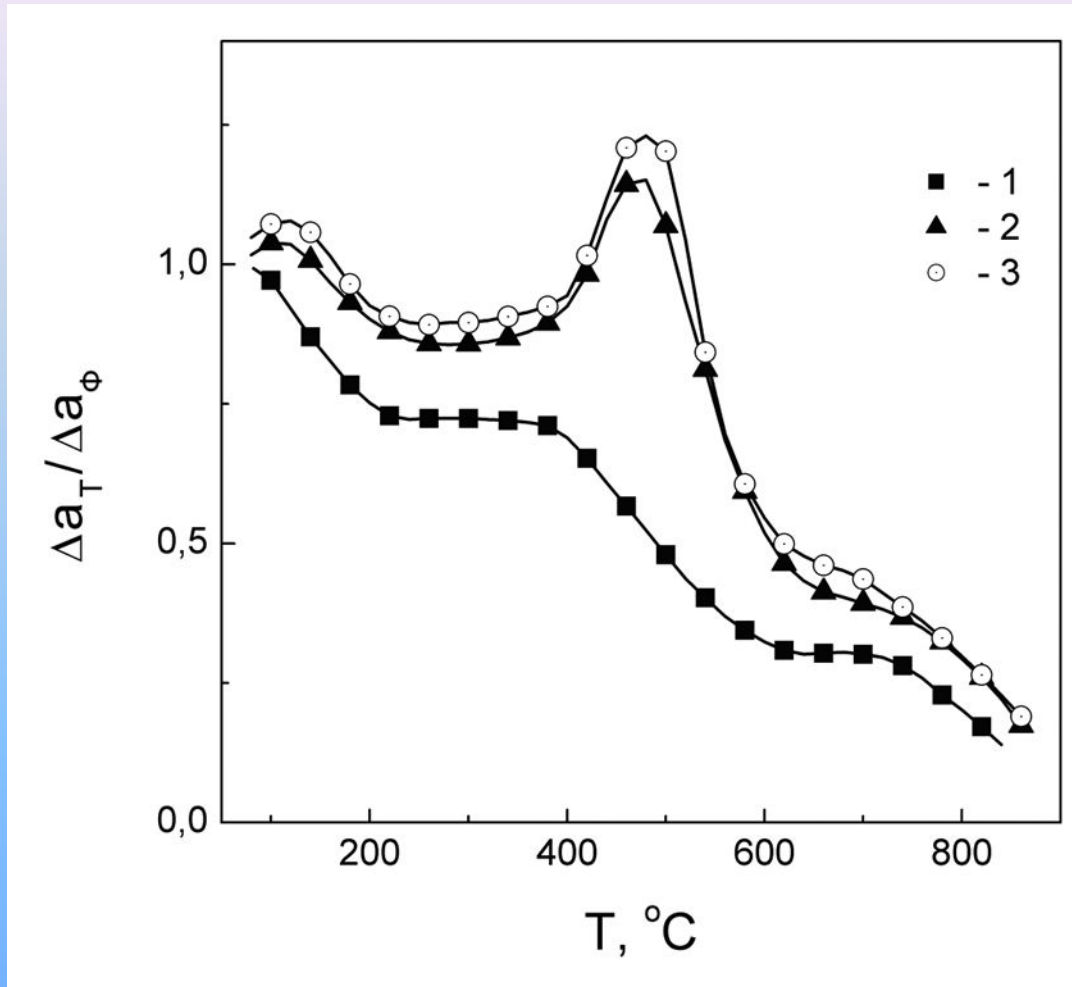


Изменение периода решетки  $\Delta a$  в имплантированном кремнии в зависимости от плотности тока ионов  $J_{эф}$ :

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



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

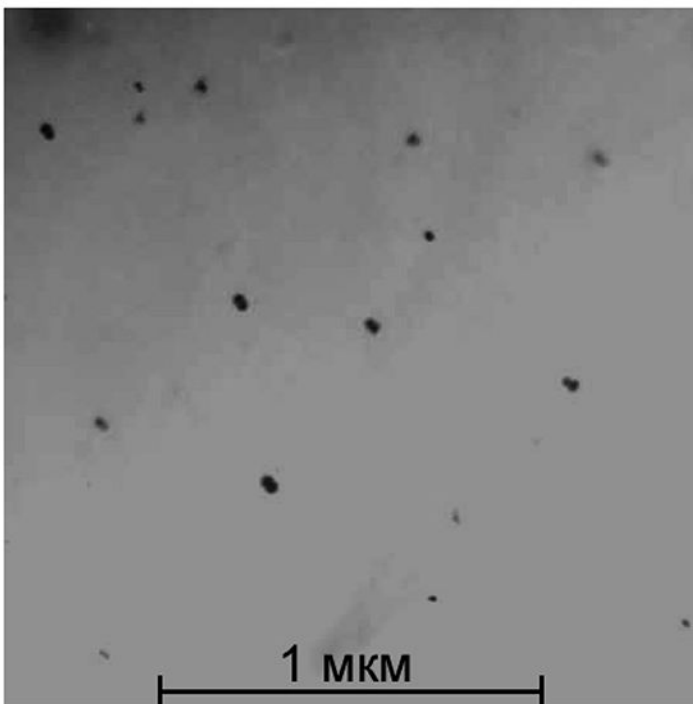


Восстановление периода решетки в кремнии, имплантированном ионами В<sup>+</sup>

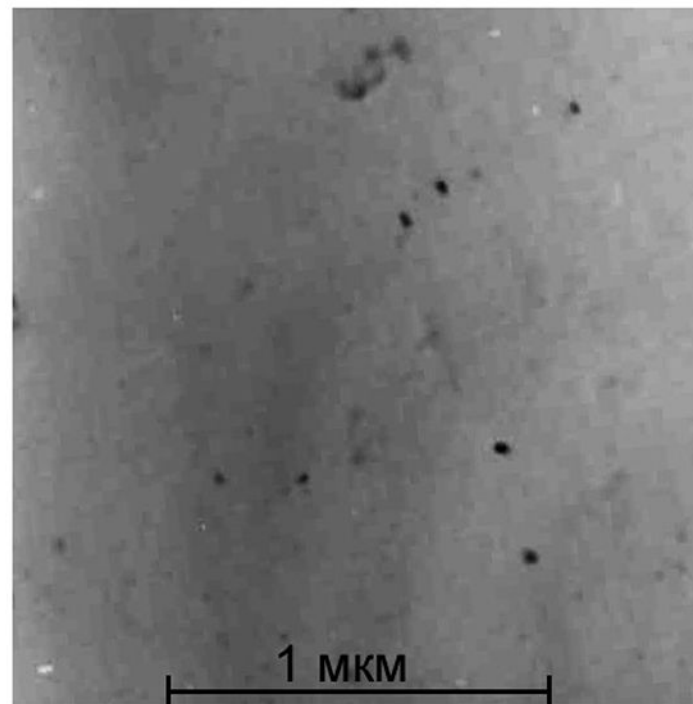
1 – Si:P,  $\rho_0 = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ;  $J_{\text{эф.}} = 0,04 \text{ мкА}/\text{см}^2$

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

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

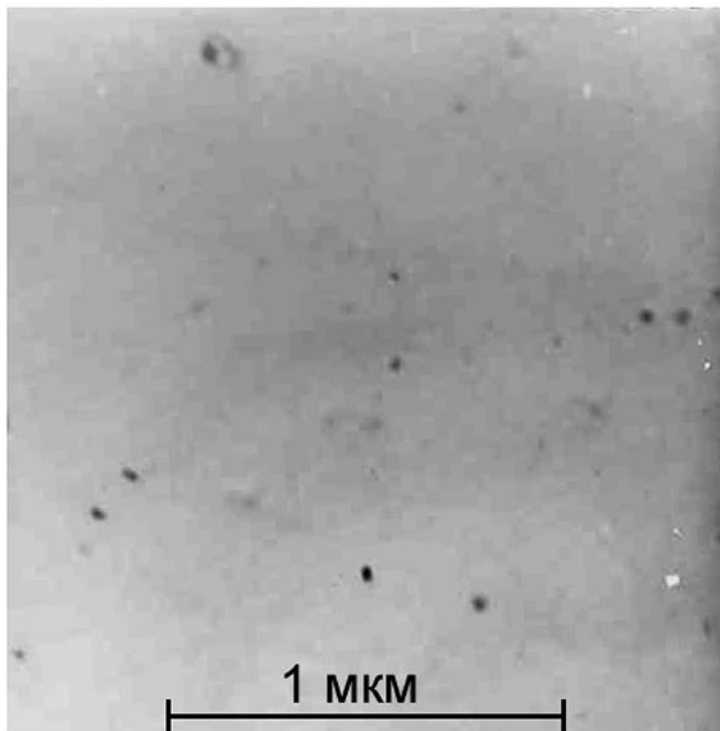


**а**

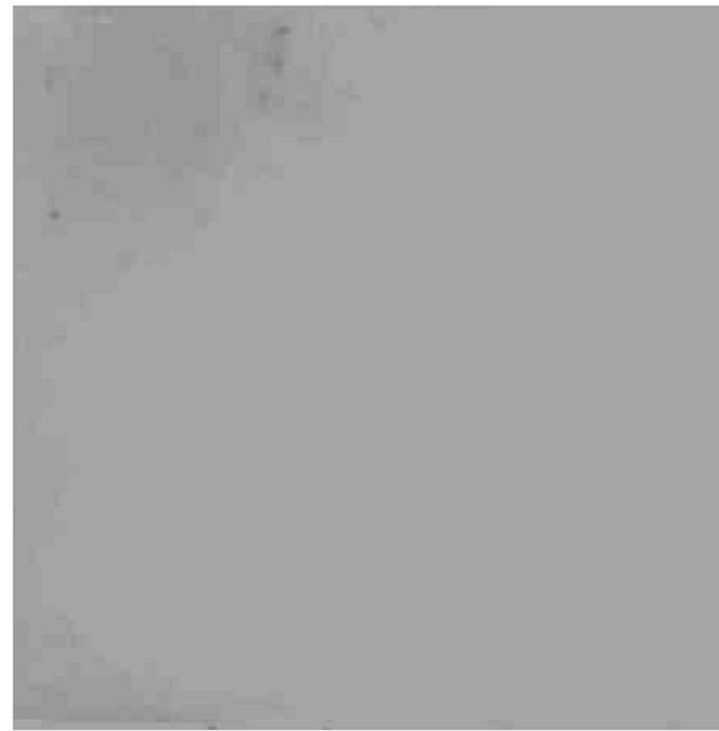


**б**

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**)

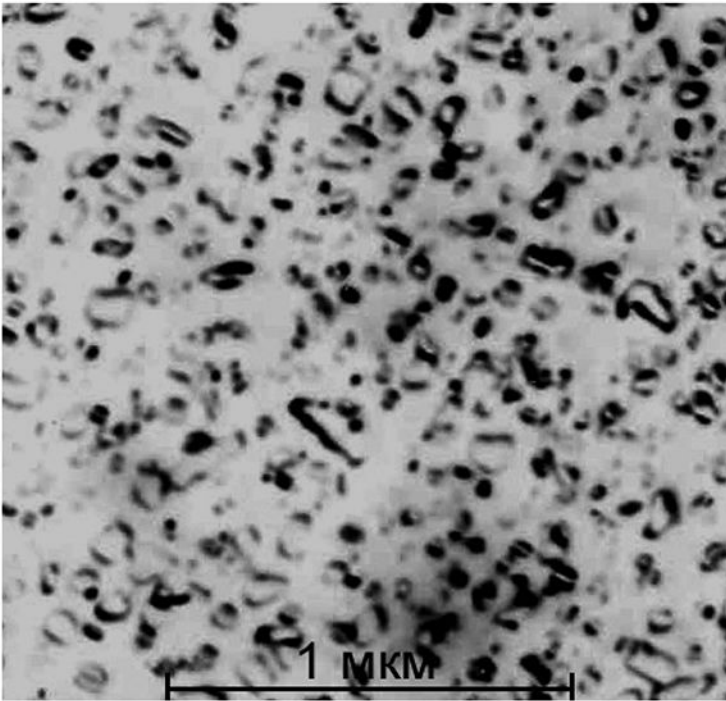


**а**

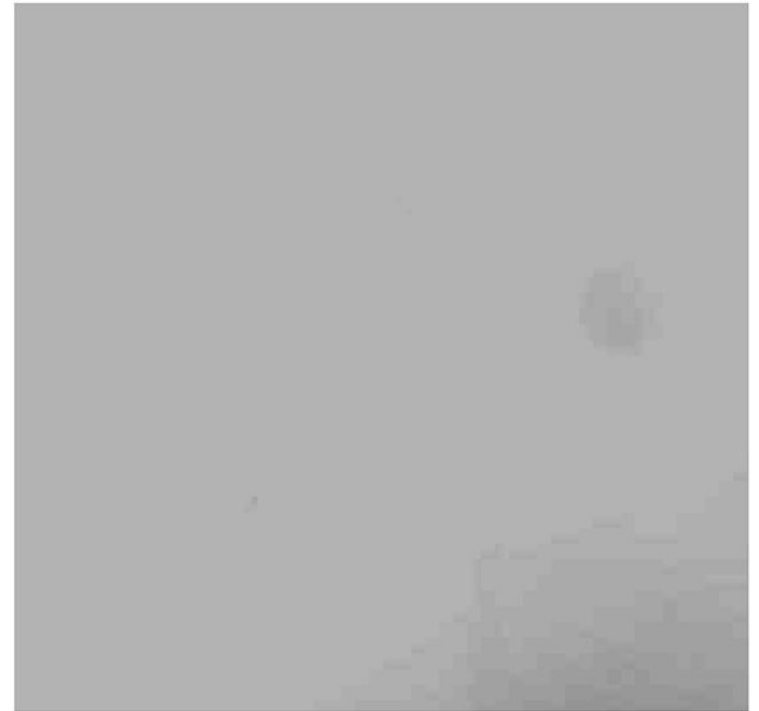


**б**

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**

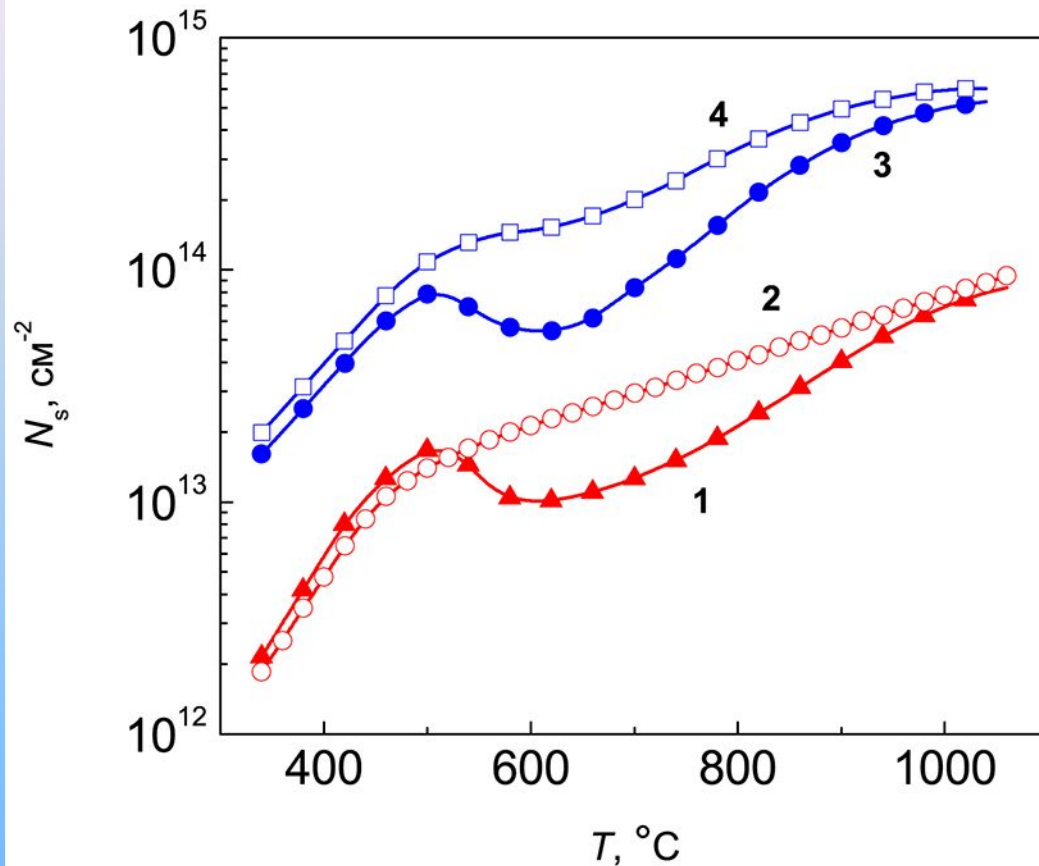


**б**

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

**легированных германием:**

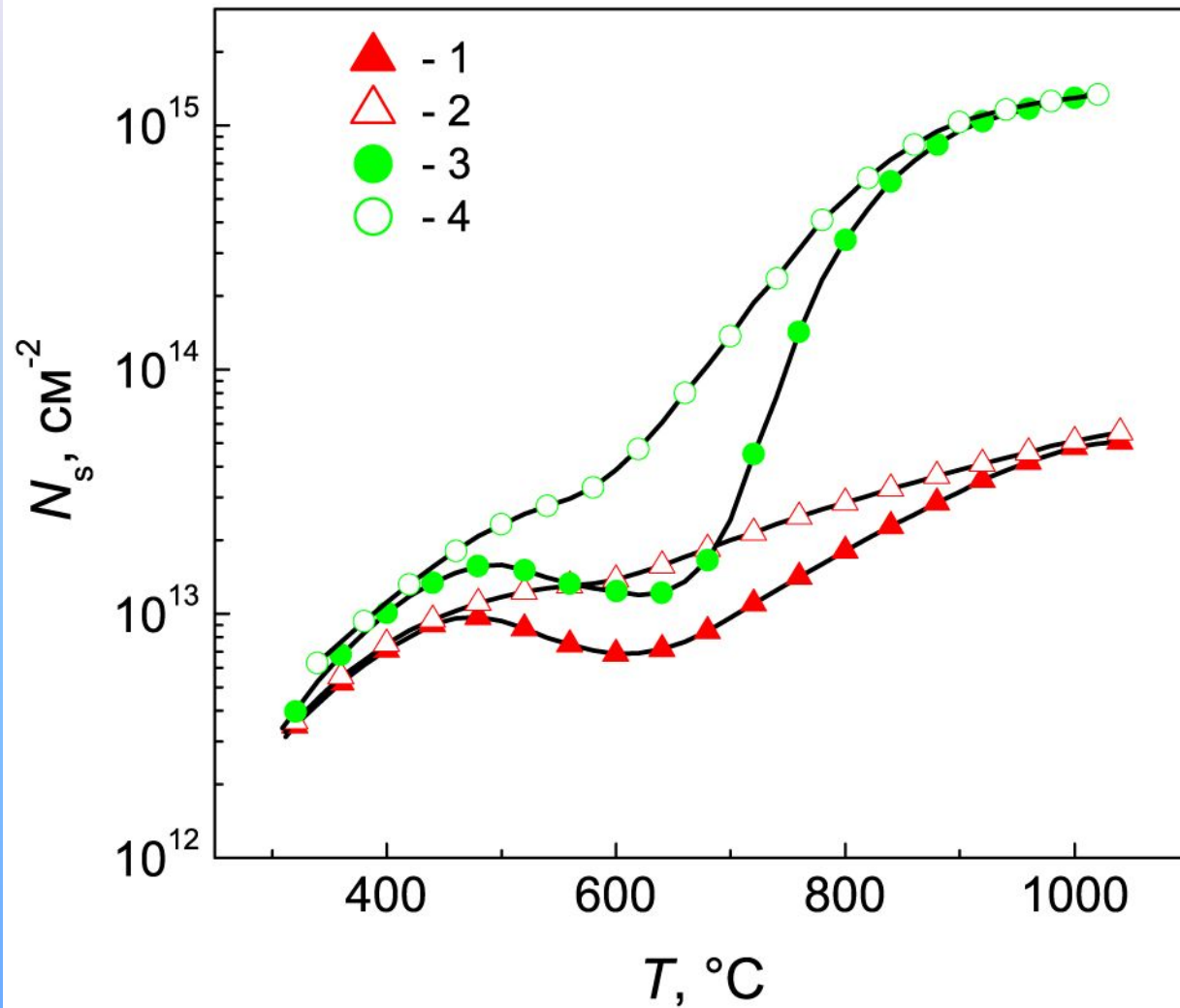
- 3 – контрольный образец, доза ионов  $\text{B}^+$   $1,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ;
- 4 – доза ионов  $\text{Ge}^+$   $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ , отжиг, доза ионов  $\text{B}^+$   $1,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$



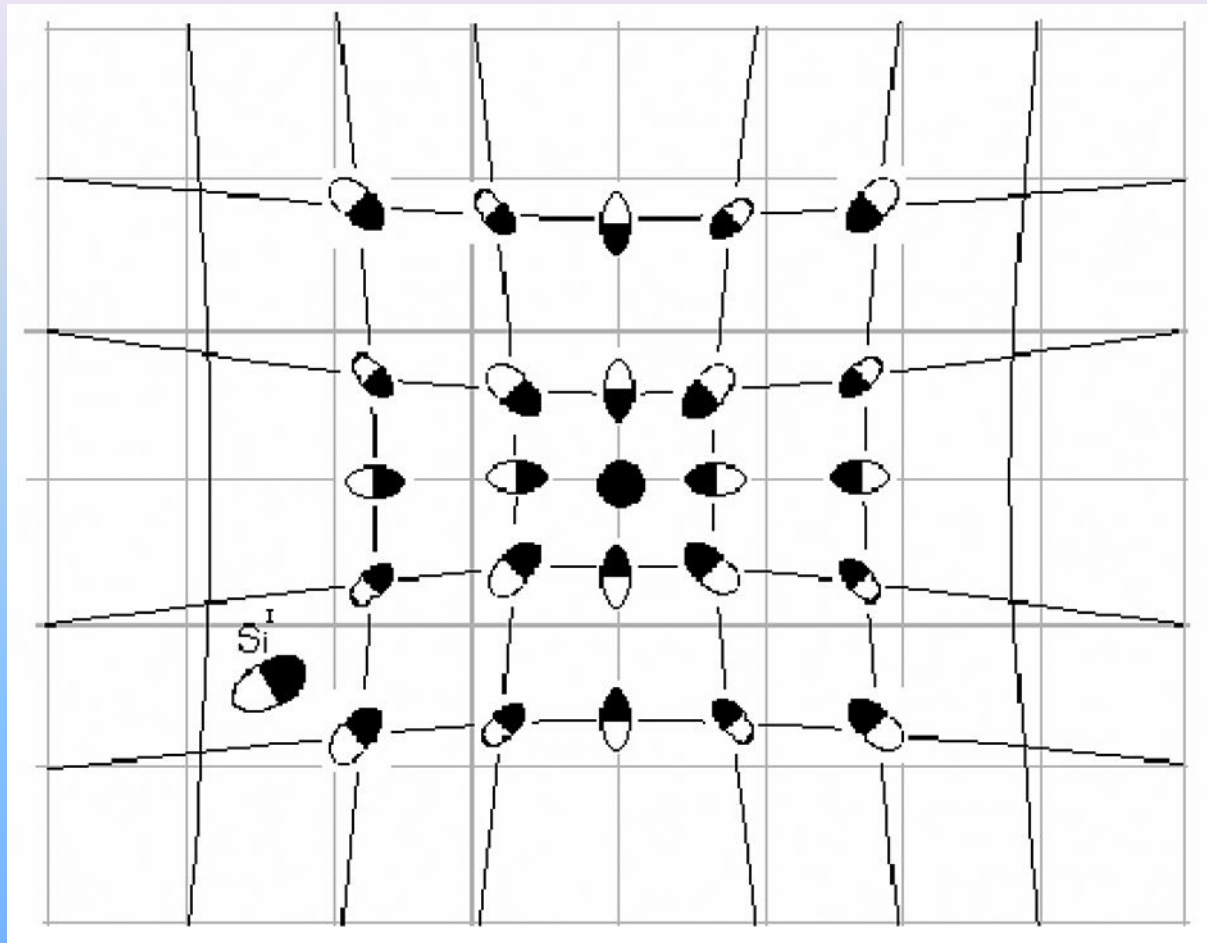


Концентрация бора, вытесненного из узлов решетки Si, легированного В ( $\rho_0 = 0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) при имплантации ионов бора

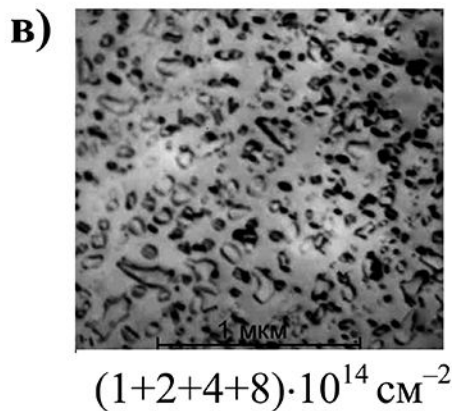
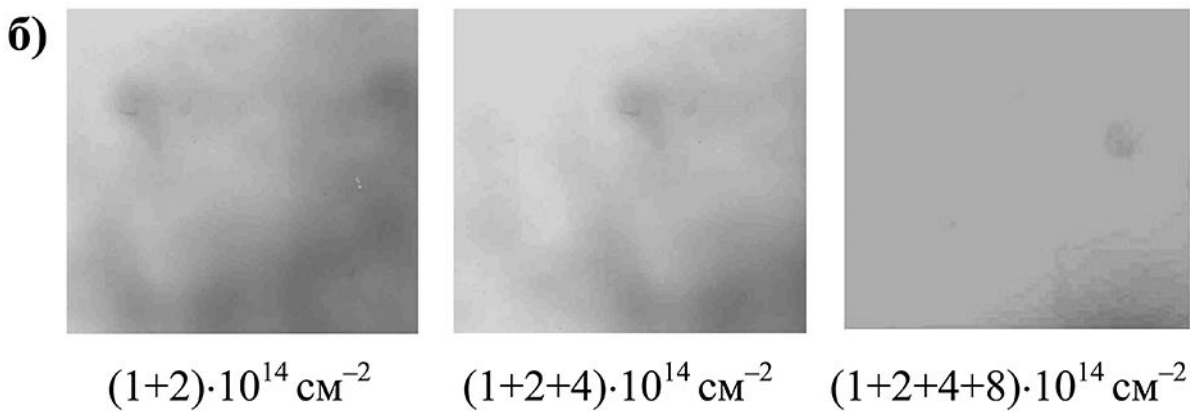
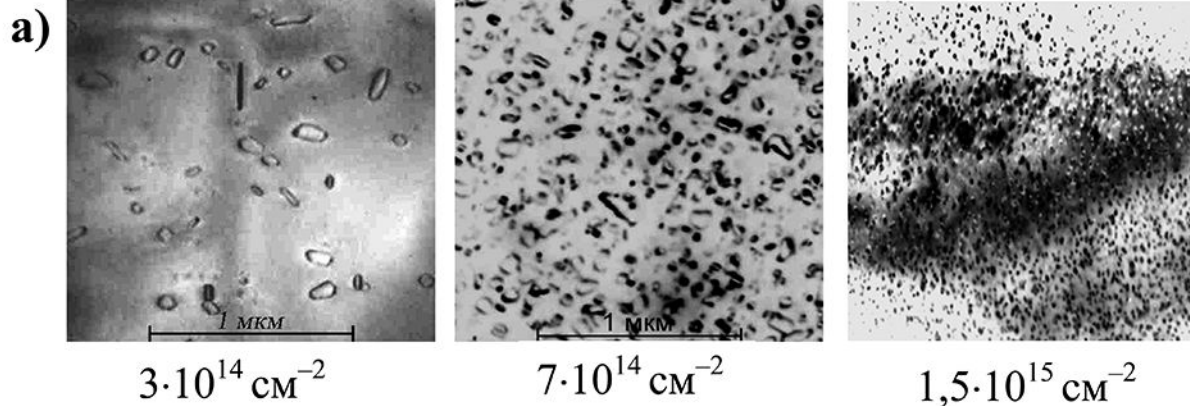
$J_{\text{эф}}, \text{ мкА/см}^2$	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0
$C_i^S, \text{ см}^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{19}$	$1,4 \cdot 10^{19}$	$6,7 \cdot 10^{18}$	$8,6 \cdot 10^{17}$	$3 \cdot 10^{17}$



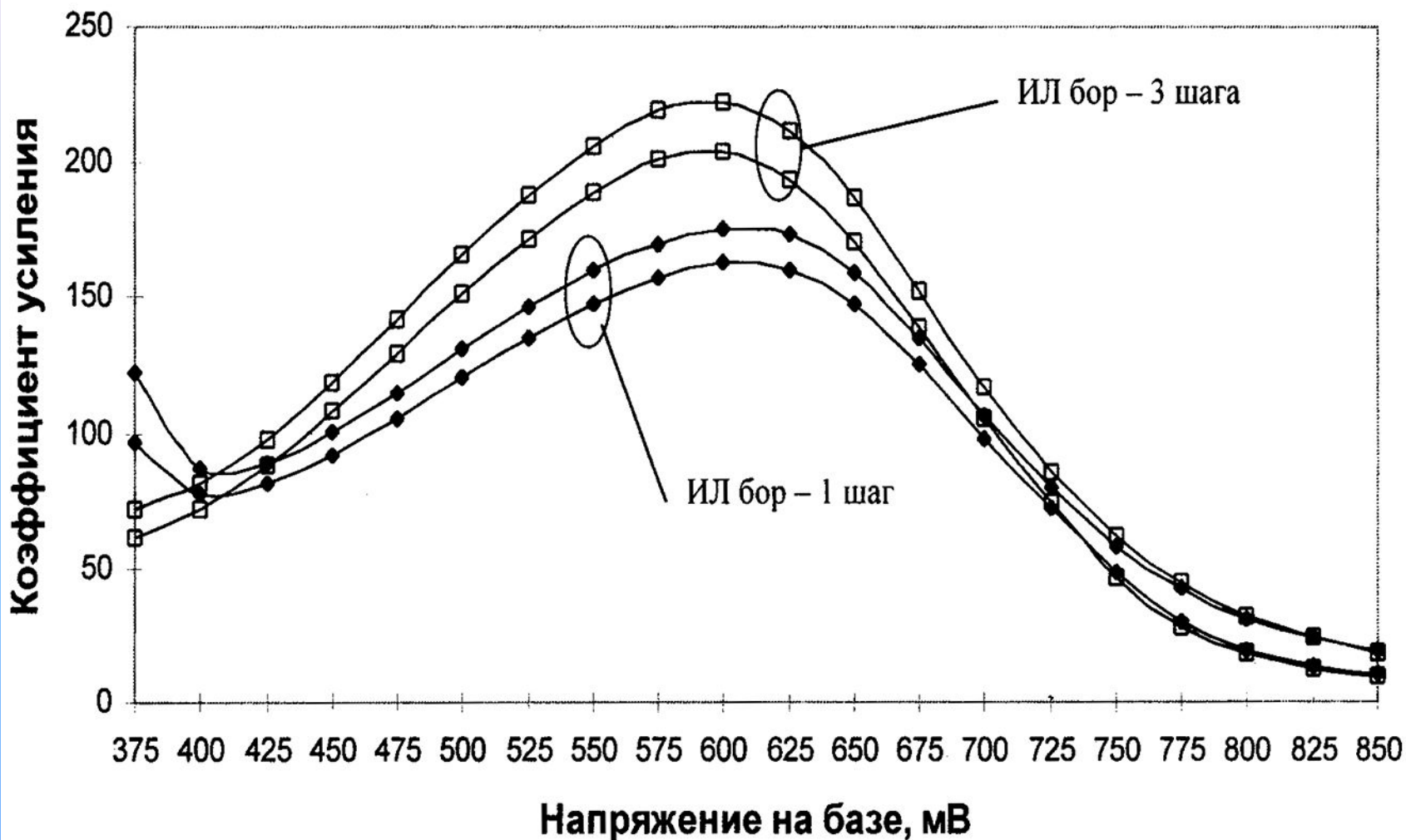
Электрическая активация имплантированных атомов бора (**1**, **2**) и фосфора (**3**, **4**); **2**, **4** – отжиг с подсветкой электронами



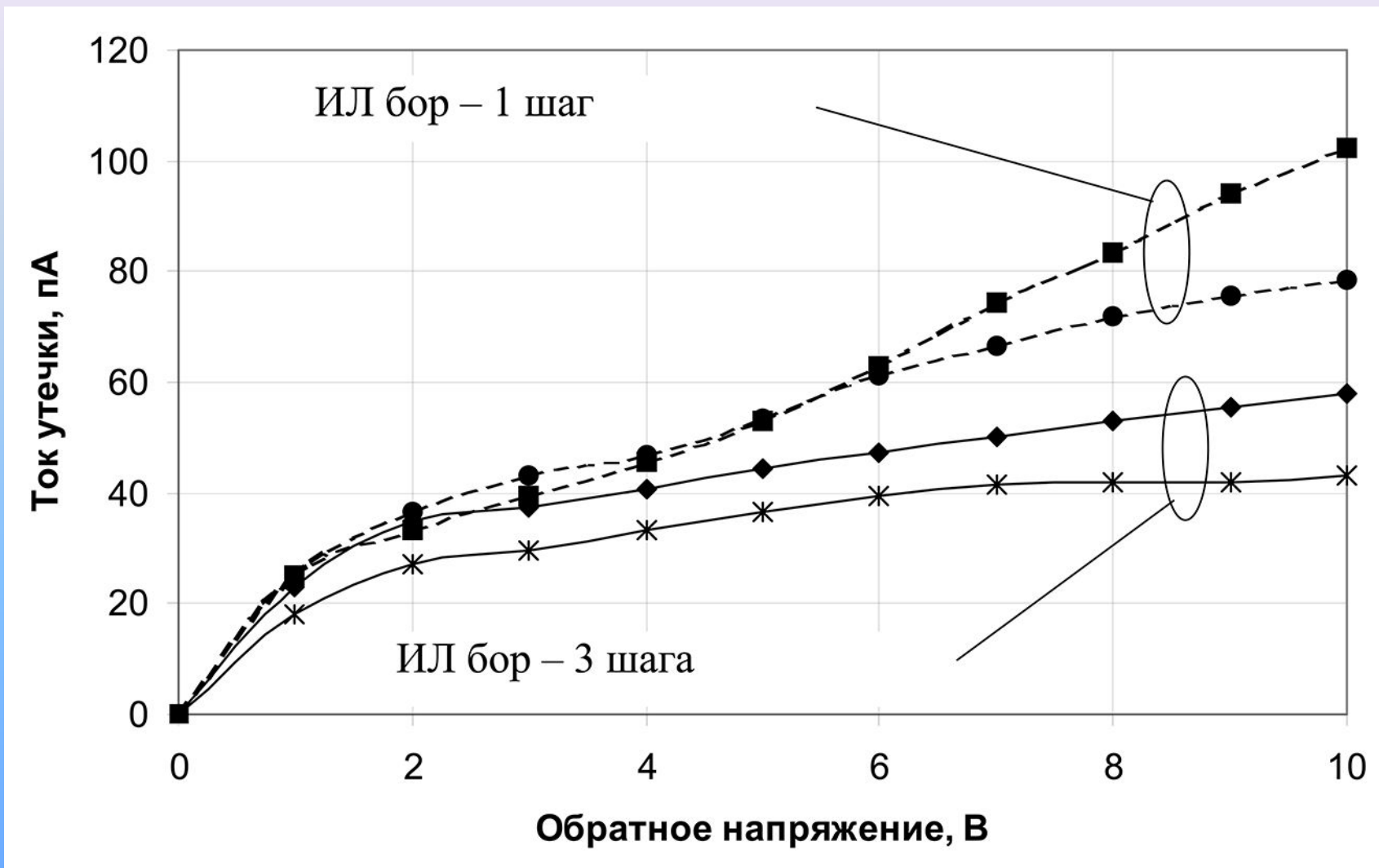
Движение атома Si в кремнии в поле упругих деформаций,  
создаваемых примесью замещения



Электронные микрофотографии кремния, имплантированного ионами В<sup>+</sup> (а), имплантированного ионами В<sup>+</sup> 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)

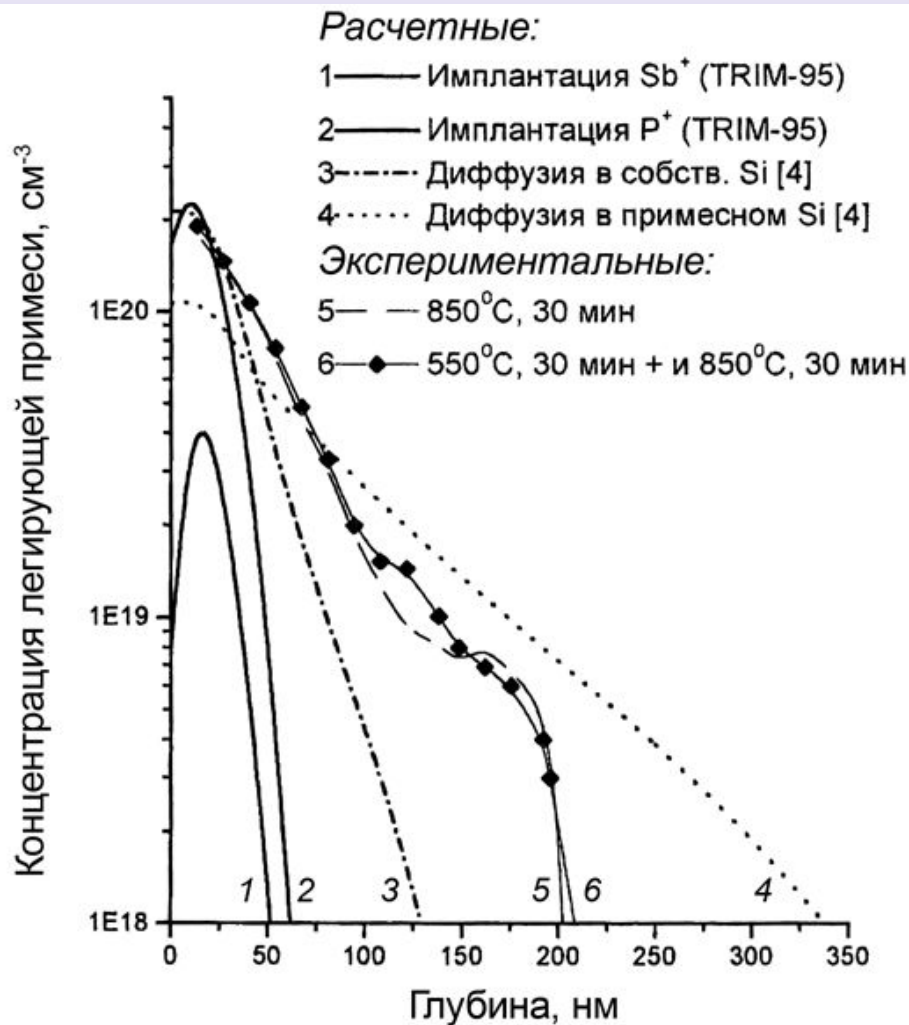


Зависимость коэффициента усиления горизонтальных транзисторов от напряжения на базе для опытной (3 шага) и текущей (1 шаг) партии



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<sup>+</sup> СЛОЕВ В КРЕМНИИ



## Имплантация:

ионы Sb<sup>+</sup>: 60 кэВ,  $1.25 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>;

ионы P<sup>+</sup>: 20 кэВ,  $8.13 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>.

## 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.

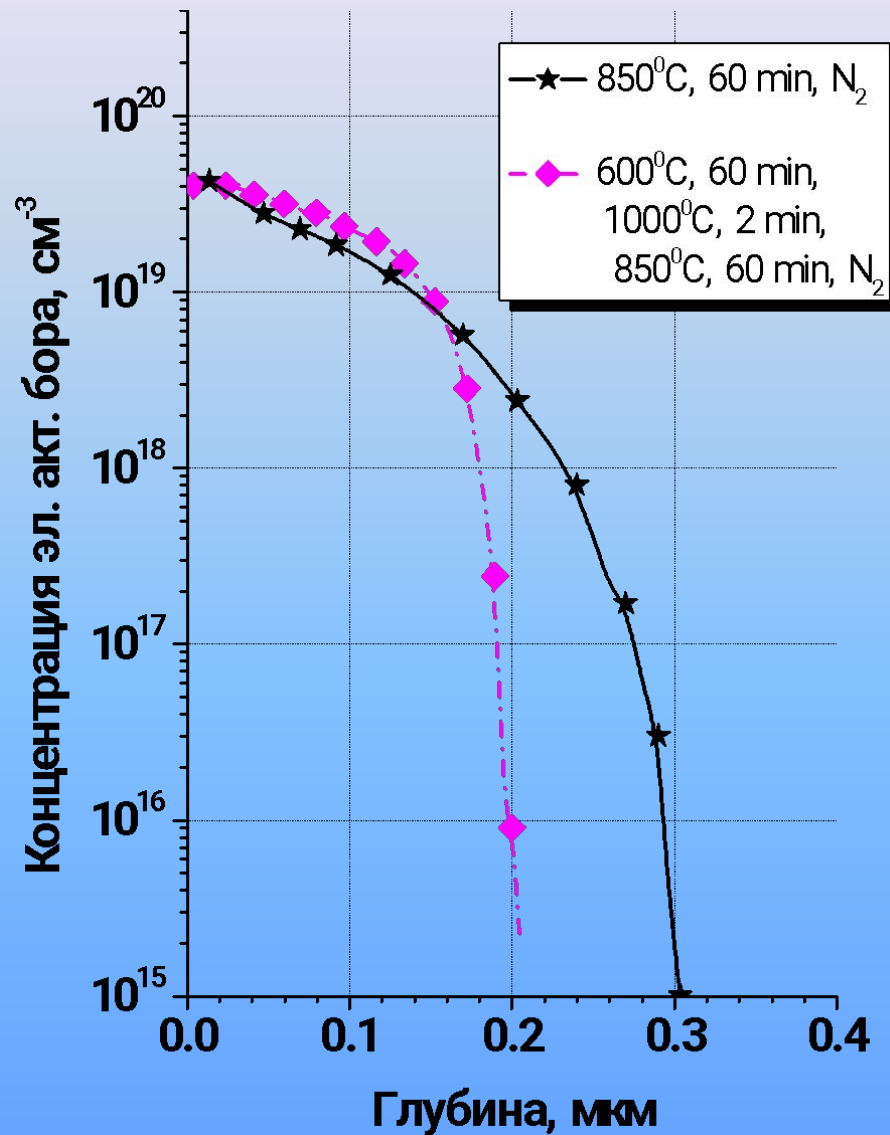
## РЕЗУЛЬТАТЫ:

1) Очень резкий n<sup>+</sup>-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

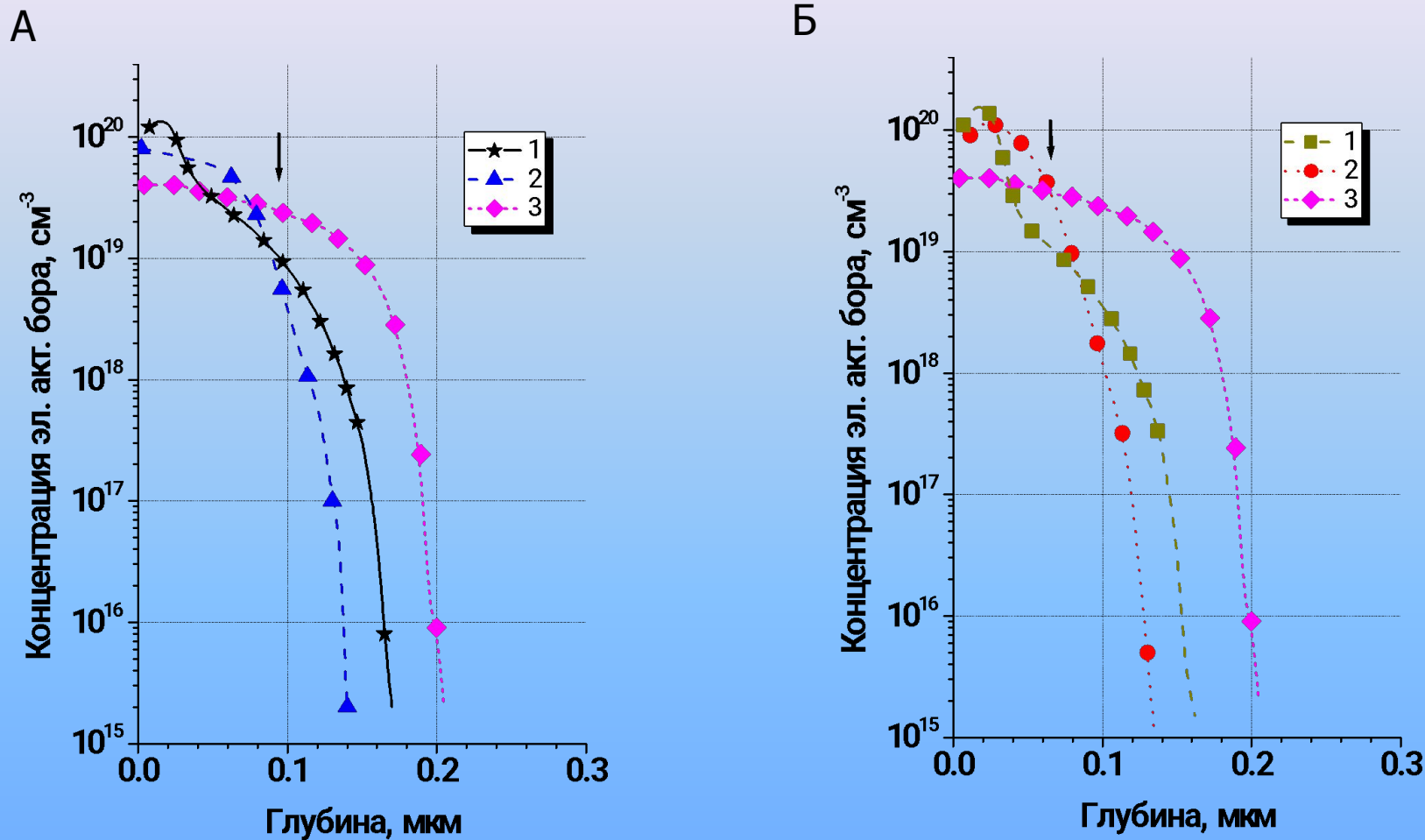


ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ

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 $\text{BF}_2^+$ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ УГЛЕРОДА



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

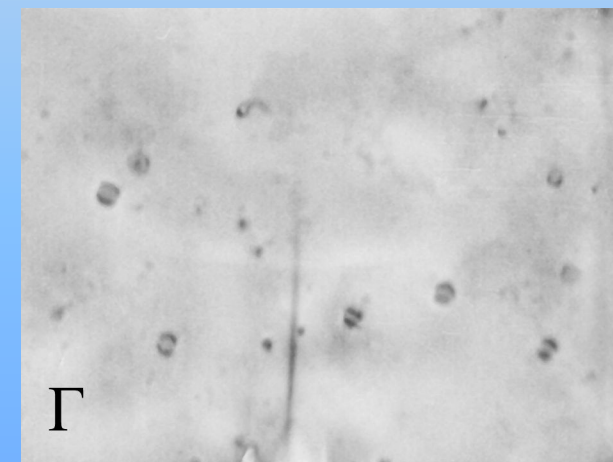
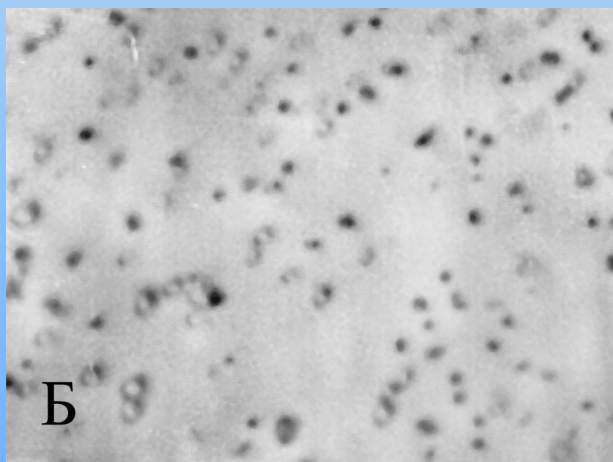
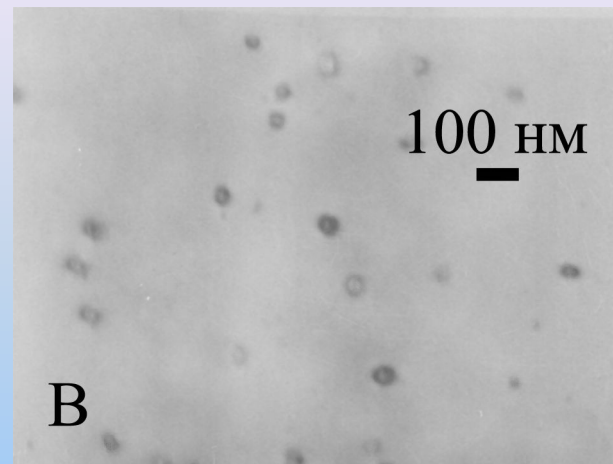
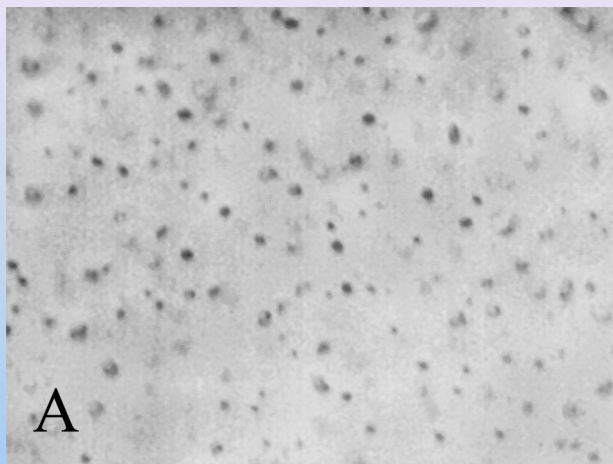
Имплантация:  $\text{BF}_2^+$  ( $20 \text{ кэВ}$ ,  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) (кривая 3);  $\text{C}^+$  (А -  $30 \text{ кэВ}$ ,  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , Б -  $20 \text{ кэВ}$ ,  $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) (кривые 1-2) и последующего термического отжига: 1)  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ , 60 минут,  $\text{N}_2$  (кривая 1). 2)  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , 60 минут;  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 2 минуты;  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ , 60 минут;  $\text{N}_2$  (кривые 2-3).

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ С ИОНАМИ $\text{BF}_2^+$ 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, $N_s$ [ $\text{см}^{-2}$ ]
	Имплантация ионов $\text{BF}_2^+$	Имплантация ионов $\text{C}^+$	Термообработка		
1	20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	–	850°C, 60 минут	450	$3.81 \times 10^{14}$
2	20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	–	600°C, 60 минут, 1000°C, 2 минуты, 850°C, 60 минут	421	$4.2 \times 10^{14}$
3	20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	20 кэВ, $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	850°C, 60 минут	448	$4.38 \times 10^{14}$
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	$4.95 \times 10^{14}$
5	20 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	30 кэВ, $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	850°C, 60 минут	456	$4.59 \times 10^{14}$
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	$4.93 \times 10^{14}$

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ С ИОНАМИ $\text{BF}_2^+$ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ УГЛЕРОДА



Светлопольные микрофотографии структуры кремния. Имплантация ионов  $\text{BF}_2^+$  ( $20 \text{ кэВ}$ ,  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и  $\text{C}^+$  ( $20 \text{ кэВ}$ ,  $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) – В, Г. Термообработка: 1)  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  – 60 минут, в среде  $\text{N}_2$  – А, В. 2)  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  – 60 минут,  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  – 2 минуты,  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  – 60 минут, в среде  $\text{N}_2$  – 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