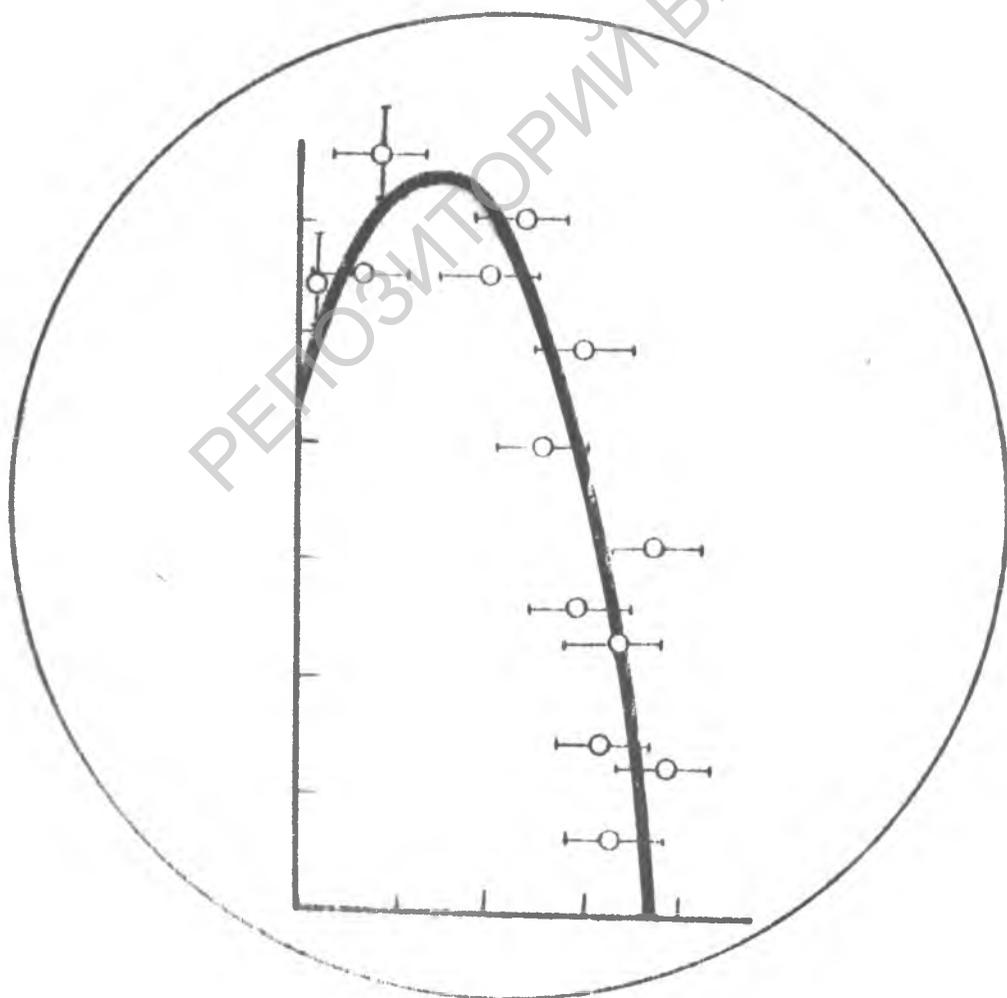


PROCEEDINGS  
OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE  
ON ION IMPLANTATION  
IN SEMICONDUCTORS

POLAND LUBLIN 9-12 September 1974

VOL.1



## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ В КРЕМНИИ, ОБЛУЧЁННОМ ИОНАМИ АРГОНА

Гётц Г., Клинге К.-Д., Швабе Ф.,

Университет им.Ф.Шиллера, Йена, ГДР

Гуманский Г.А., Соловьёв В.С., Ташлыков И.С.,

Белорусский государственный университет им.В.И.Ленина,  
Минск, СССР

Методом обратного рассеяния протонов и ионов гелия в сочетании с послойным стравливанием изучалось разупорядочение структуры на различных глубинах в эпитаксиальном кремнии при внедрении ионов аргона с энергией 200 кэВ и интегральным потоком от  $5 \times 10^{14}$  до  $5 \times 10^{15}$  ионов/см<sup>2</sup> при 20°С и 200°С и последующем отжиге.

Установлено наличие разупорядочения на глубинах больше 1 мк, т.е. превышающих пробег ионов, показано влияние условий облучения и термообработки на глубину распределения радиационных нарушений.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проведённые к настоящему времени немногочисленные исследования [1-3] дают основание полагать, что процесс ионного внедрения сопровождается образованием нарушений кристаллической структуры не только в области пробега ионов. Совершенно очевидно, однако, что эти вопросы требуют более детального изучения вследствие значительного научного и практического интереса. Особенно важным представляется изучение физических

свойств переходной области между ионно-легированным слоем и кристаллической матрицей, поскольку от состояния этой области могут зависеть многие параметры элементов, получаемых методом ионного внедрения.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводились с применением метода обратного рассеяния (ОР) протонов и ионов гелия на эпитаксиальных монокристаллических слоях кремния. Использование эпитаксиального кремния обусловлено следующими соображениями:

- а) чистотой и совершенством структуры слоев,
- б) возможностью изготовления тонких образцов больших размеров [4] для работы в условиях, когда анализирующий пучок ионов (в нашем случае протонов) может зондировать объект по всей глубине с обеих сторон.

Эпитаксиальные слои наращивались на монокристаллических подложках толщиной 200-250 мк, легированных сурьмой ( $\rho = 10^{-2} - 10^{-3}$  омсм). Сами слои были легированы фосфором ( $\rho = 1-3$  омсм) толщина их составляла от 3,8 до 13 мк, ориентация поверхности - (111). Методика изготовления тонких образцов для зондирования всей толщины описана в [5]. Послойное стравливание толстых образцов осуществлялось с помощью метода анодного окисления.

Внедрение ионов аргона с  $E=200$  кэВ и дозой от  $5 \times 10^{14}$  до  $5 \times 10^{15}$  см $^{-2}$  производилось на каскадном генераторе с сепарацией пучка при плотности тока  $\leq 0,5$  мкасм $^{-2}$ . Образцы были разориентированы на  $7^\circ$  относительно оси пучка. Температура их во время облучения составляла  $20^\circ\text{C}$  и  $200^\circ\text{C}$ . Отжиг образцов

проводился в вакууме  $10^{-5}$  торр в течение получаса.

Ионометрические исследования выполнялись на 2-х-мэвном генераторе Ван-де-Граафа в Отделе прикладной физики-2 Йенского университета им. Ф.Шиллера. Снимались спектры ОР для неориентированного кристалла (случайное направление) и при ориентировании оси кристалла  $\langle III \rangle$  в направлении пучка. Диаметр пучка составил 0,7 мм, угол дивергенции -  $10^{-2}$  градуса. Регистрация обратно рассеянных ионов при угле  $\Theta \approx 163^\circ$  осуществлялась полупроводниковыми детекторами с разрешающей способностью 25 кэв в случае протонов и 16 кэв для ионов гелия. Среднее значение тока анализирующего пучка не превышало 5 нА, общий заряд при снятии одного спектра составлял 5 мккулон. Энергетический анализ производился с помощью 256-канального анализатора.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. ИМПЛАНТАЦИЯ

Из представленных на рис. 1-4 спектров ОР протонов видно, что:

а) зондирование с обратной стороны позволило обнаружить не только приповерхностный пик нарушений, но и разупорядочение на глубине (рис.4),

б) глубинное разупорядочение заметно проявляется на спектрах ОР, когда возле поверхности при внедрении образуется сплошной аморфный слой (при  $\Phi = 1,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ), причем нарушения структуры охватывают весь исследуемый кристалл.

Чтобы уточнить, связано ли такое разупорядочение только с возможной упругой деформацией решётки из-за наличия аморфного слоя вблизи поверхности, были сняты спектры ОР ионов гелия на послойно стравленных образцах (рис.5, шкала глубин

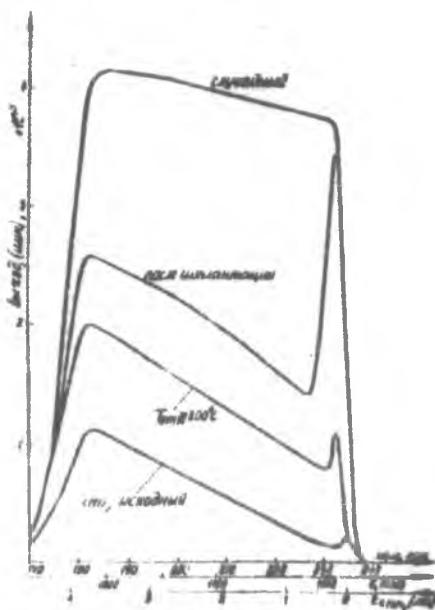


Рис.1

Спектры ОР протонов с  $E_0 = 1,4 \text{ мэВ}$   
 $\Phi_{Ar^+} = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{импл}} = 20^\circ \text{C}$ .  
 Тонкий образец.

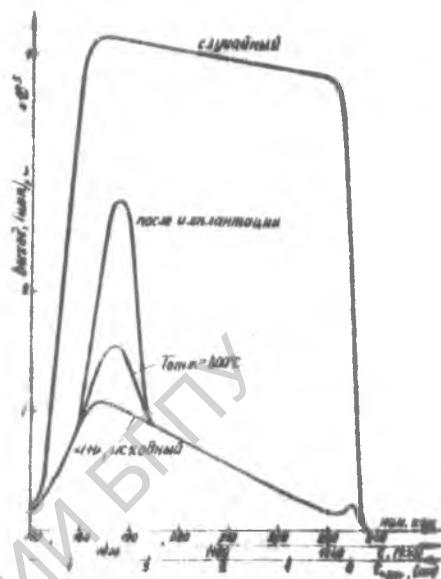


Рис.2

Обозначения те же, что на рис.1. Зондирование с обратной стороны.

для спектров ионов гелия (приведена на рисунках для профилей распределения дефектов по глубине). На рис. 6 построен профиль распределения дефектов, рассчитанный по методу, предложенному в [6], применительно к нашему случаю, в [5]. Видно, что остаточные дефекты присутствуют на глубине  $> 1 \text{ мк}$  (для ионов аргона с  $E = 200 \text{ кэВ}$ ,  $R_p = 0,25 \text{ мк}$ ), однако, количество дефектов меньше, чем в тонких образцах (сравните выход ОР), хотя доза внедрения больше. Очевидно, что в случае тонких образцов сказывается дополнительное влияние упругих напря-

Рис.3

Спектры ОР протонов с  $E=0,8$  мэв,  $\Phi_{Ar^+} = 1,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{импл} 20^\circ\text{C}$ . Тонкий образец.

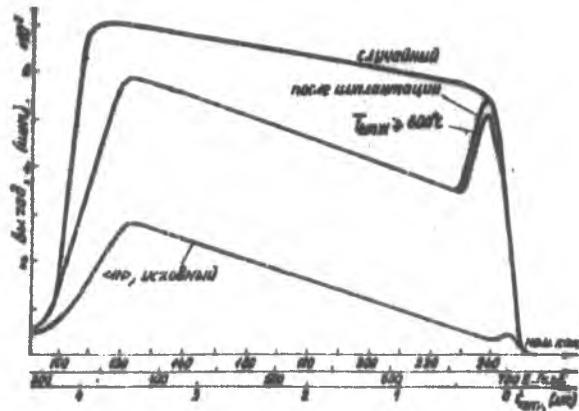
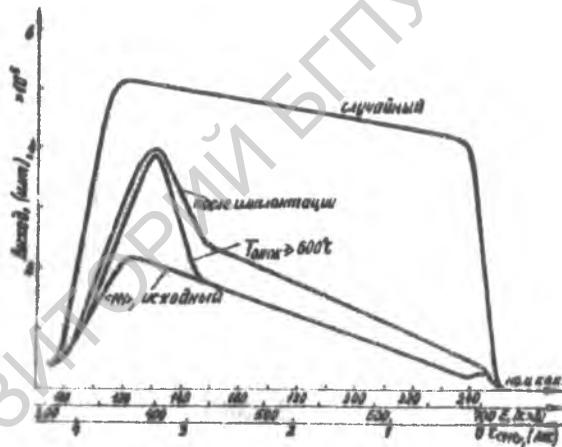


Рис.4

Обозначения те же, что на рис.3. Зондирование с обратной стороны.



жений.

Рис. 7-9 демонстрируют влияние "горячей" имплантации. Несмотря на то, что в области пика образуется гораздо меньше нарушений, чем при "холодном" внедрении, спектры обнаруживают далёкие "деканализованные хвосты", что может быть объяснено только дальнедействующими напряжениями, имеющими в большей степени упругий характер. Вероятнее всего, здесь сказывается частичная коагуляция внедрённого аргона. Другим совер-

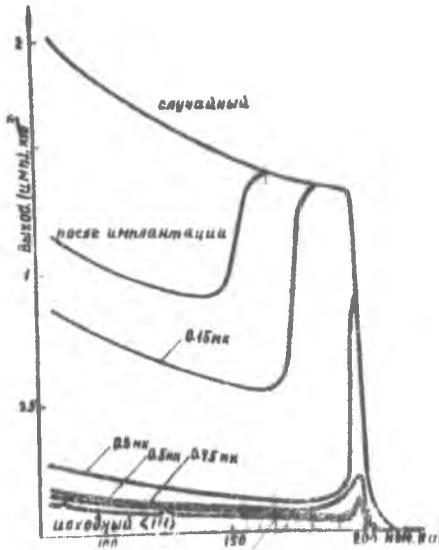


Рис.5

Спектры ОР ионов гелия с  $E = 1,4$  мэв,  $\Phi_{Ar^+} = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{импл}} = 20^\circ \text{C}$ .

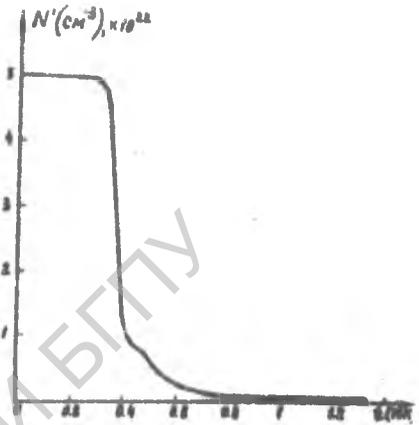


Рис.6

Профиль дефектов, рассчитанный из спектров рис.5 (кривая построена по начальным точкам и полностью для спектра "0,75мк")

шенно неожиданным фактом является увеличение выхода ОР после удаления слоя 0,15 мк. Мы объясняем это следующим образом. После имплантации получается практически трёхслойная структура, в которой слой с повышенной концентрацией дефектов заключён между двумя более совершенными в структурном отношении слоями. Удаление одного из этих слоёв приводит к одностороннему освобождению среднего слоя в результате чего усиливаются искажения как в этом слое, так и на глубине.

Рис. 7

Спектры ОР протонов с  $E=1,4$  мэв,  $\Phi_{A_{p,2}} = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{импл}} = 200^\circ\text{C}$ . Зондирование с обратной стороны, тонкий образец.

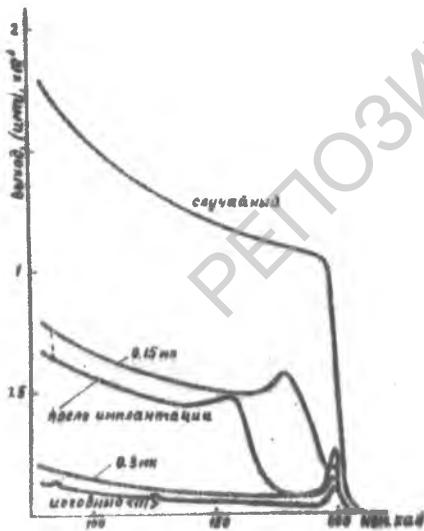
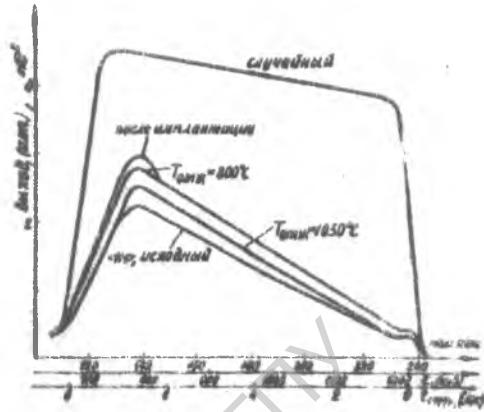


Рис. 8

Спектры ОР ионов  $\text{He}^+$  с  $E=1,1$  мэв  $\Phi_{A_{p,2}} = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{импл}} = 200^\circ\text{C}$ . Толщина слоёв дана на рис. 9.

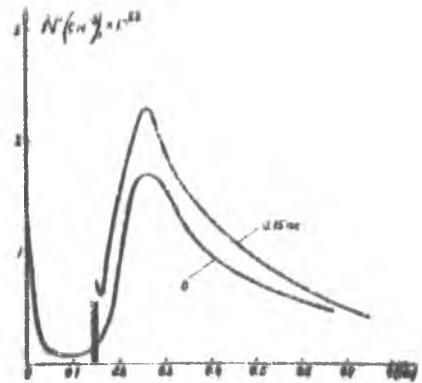


Рис. 9

Профили дефектов, рассчитанные из спектров "0" и "0,15 мк" рисунка 8.

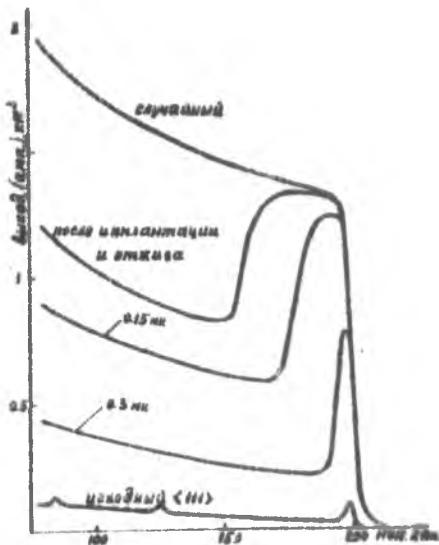


Рис. 10

Спектры ОР ионов  $\text{He}^+$  с  $E_0 = 1,4$  мэВ от отожженных кристаллов.  $\Phi_{\text{Ar}^+} = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{импл}} = 20^\circ \text{C}$ ,  $T_{\text{отж}} = 800^\circ \text{C}$ ; толщина снятых слоев указана на рис. 12, спектр "0,5 мк" совпадает с исходным.

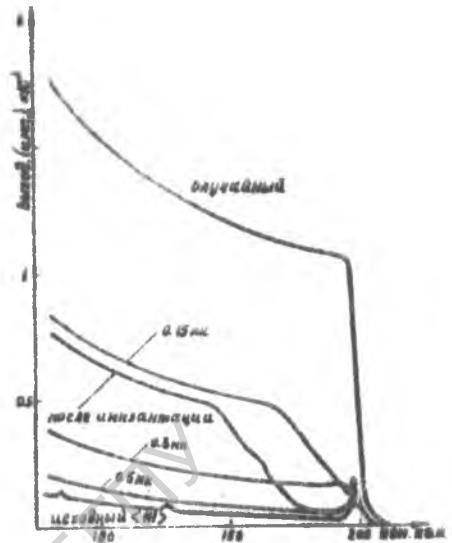
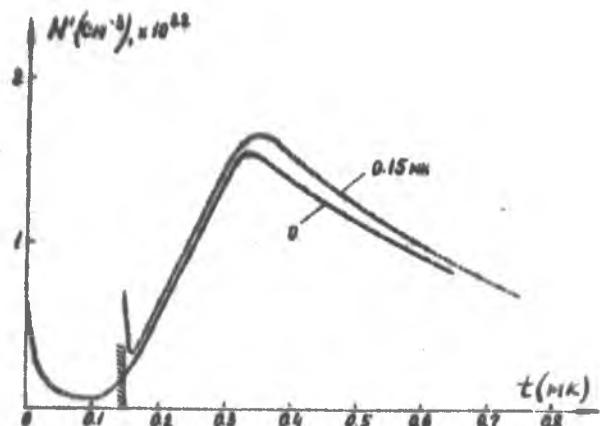


Рис. 11

Спектры ОР ионов  $\text{He}^+$  с  $E_0 = 1,1$  мэВ,  $\Phi_{\text{Ar}^+} = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ,  $T_{\text{импл}} = 200^\circ \text{C}$ ,  $T_{\text{отж}} = 800^\circ \text{C}$ , толщина снятых слоев указана на рис. 12

Рис. 12

Профили дефектов, рассчитанные из спектров "0" и "0,15" мк на рис. 11.



Дальнейшее стравливание ведёт к снятию далекодействующих упругих напряжений, а остаточные дефекты на глубине, в отличие от случая "холодной" имплантации, проявляются слабо, что может быть вызвано влиянием динамического отжига во время имплантации.

#### 4. ОТЖИГ

Анализ спектров ОР для отожжённых образцов позволяет заключить следующее:

- а) отжиг даже при больших температурах не приводит к полному залечиванию дефектов в области пика нарушений, на что уже указывалось в работе [7] и связывается со специфичностью аргона как примеси;
- б) нарушения неупругого характера на глубине отжигаются полностью в случае "холодной" имплантации;
- в) искажения решётки на глубине после "горячего" внедрения не только уменьшаются, но даже увеличиваются (рис. I1 и I2), что вызвано явной, хотя и не очень выраженной диффузией аргона вглубь образца. Стимулирующее действие при этом оказывает, на наш взгляд, весьма совершенный поверхностный слой.

В заключение авторы выражают признательность Х.Трэффу, И.М.Белому, К.Дирэе, Х.Рудольф, В.С.Тишкову за помощь в работе.

#### Литература

1. Гусев В.М., Титов В.В., Радиационная физика кристаллов и р-п переходов. Минск, 1972.
2. Bertollioti M., Sette D., Stadni L., Vitali G., Radiat. eff., 15, Nr. 1-2, 31, /1972/

3. Успенская Г.И., Генкин В.М., Тетельбаум Д.И., Кристаллография, 18, вып.6, 363, /1973/
4. Van Dijk H.J.A., de Jonge J., J. Elektrochem. Soc., 117, 553, /1970/
5. Götz G., Klinge K.-D; Exp. Techn. Phys., 21, 473, /1973/
6. Westmoreland J.E., Mayer J.W., Eisen F.H., Welch B., Radiat. eff., 6, 161, /1970/
7. Glaser E., Diplomarbeit, Jena. 1973.

## DISCUSSION

А.ФИДЕРКЕВИЧ: 1/Какие детекторы и электронику Вы применяли в своей работе ?

2/ Каким образом Вы определили разрешающую способность /8 кэВ для протонов и 14 кэВ для  $\alpha$ -частиц/?

К.Д.КЛИНГЕ: 1/ Мы применяли детекторы фирмы "Ортек" и электронику "Вакутроник".

2/ Мы определили разрешающую способность с помощью очень тонких слоев углерода на поверхности образца.

.GYULAI: If looking from the back surface, the disorder peak seems to be at greater depth. How this matches the channeled and dechanneled stopping powers ?

K.D.KLINGE: The reason for this is the difference in the energy loss value for the channeled and nonchanneled particles. Looking from the back surface, the energy loss for the channeled particles up to the damage peak is smaller than the energy loss for the nonchanneled particles at the same distance. The showed depth scale is valid only for the channeled spectrum.

В.ЖУК: Замечание - Наши исследования по диффузионному распределению примесей при наличии дополнительной бомбардировки, находятся в согласии с Вашим заключением, что нарушения решетки значительно глубже чем распределение внедренных ионов.