

AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN DER DDR
ZENTRALINSTITUT FÜR KERNFORSCHUNG
ROSSENDORF BEI DRESDEN

ZfK - 360

INTERNATIONAL CONFERENCE
ON
ION IMPLANTATION IN SEMICONDUCTORS

Proceedings

Part I

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО
ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

сборник докладов

том I

Reinhardtbrunn, 23 - 29 October, 1977

Editor: K. Hohmuth

Redaction: B. Schmidt

Technical Redaction: I. Lippmann, Chr. Völzke

July 1978

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОТЕМПЕРА-
ТУРНОГО ВНЕДРЕНИЯ ИОНОВ УГЛЕРОДА В
КРЕМНИЙ

Гуманский Г.А., Комаров Ф.Ф., Ташлыков И.С.,
Тишков В.С.

НИИ прикладных физических проблем Белорусского го-
сударственного университета им.В.И.Ленина, г.Минск,
СССР

Гетц Г., Швабе Ф.

Университет им.Ф.Шиллера, Йена, ГДР.

I. Введение.

К настоящему времени в ряде экспериментов [1 - 6] по-
лучены данные, позволяющие сформировать достаточно полную
физическую картину процессов, протекающих в кремнии при им-
плантации больших интегральных потоков ионов углерода.

Темой данной работы было изучение образования дефектов,
распределения их по глубине кристалла, а также выяснение
пространственного распределения внедренных атомов углерода;
изучение структурных превращений при высокотемпературной им-
плантации ионов C^+ в кристаллы кремния.

Исследования выполнялись методами обратного рассеяния
ускоренных ионов He^+ и дифракции электронов на отражение.

2. Условия эксперимента.

Пластинки эпитаксиального кремния, ориентированные по-
верхностью по плоскости (111), имплантировались ионами угле-
рода с энергией 30 кэВ. Температура легирования поддержива-
лась 700 и 750°C. Интегральный поток ионов составлял 2×10^{17}
и 3×10^{17} ион/см² соответственно. Плотность тока ионов бы-
ла 1,2-1,5 мкА/см². Термический отжиг выполнялся при темпе-
ратуре 850 и 1000°C в атмосфере сухого азота в течение 20 ми-
нут. Исследование имплантированных кристаллов проводилось
на электростатическом ускорителе физического факультета
Йенского университета с помощью пучка ионов He^+ , ускоренных
до энергии 1,4 МэВ, а также на электронографе при ускоряющем

напряжении 60 кэВ.

Снимались спектры обратного рассеяния при ориентировании пучка анализирующих ионов в направлении оси (III) и для неориентированного кристалла. Обратное рассеяние на угол 160° ионы гелия регистрировались кремниевым поверхностно-барьерным детектором с энергетическим разрешением 15 кэВ. При переходе к шкале глубин использовались значения потерь энергии ионов He^+ в неориентированных кристаллах кремния [7]. Расчет профилей дефектов выполнялся с учетом кратного рассеяния.

3. Экспериментальные результаты, их обсуждение.

На рис. 1а и б представлены спектры обратного рассеяния исходного кристалла кремния (кривые 1 и 2), имплантированного ионами углерода (кривые 3 и 4), а также отожженного при температуре 850 и 1000°C (кривые 5 и 6, 7 и 8 соответственно). Индекс в отношении к температуре имплантации 700°C, б - 750°C. Профили дефектов показаны на рис. 2 а и б. Анализ случайных спектров обратного рассеяния в области 90 канала и ниже (рис. 1) позволил нам получить распределение внедренного в кремний углерода по глубине. Данные приведены на рис. 3.

А. Спектры обратного рассеяния.

Обсуждая осевые спектры имплантированных при обеих температурах кристаллов отметим их двухпиковый вид. Узкий пик в области 193 канала связан с рассеянием анализирующих ионов гелия на дефектах самой поверхности. Величина выхода в пике не достигает значения случайного спектра, то есть поверхность имплантированных кристаллов нарушена, но не аморфизована. Электронографические данные (представлены ниже) подтверждают этот результат.

За приповерхностным пиком дефектов наблюдается достаточно широкий пик радиационных дефектов, залегающих на глубине $\sim 1000 \text{ \AA}^0$, довольно хорошо совпадающей с теоретически рассчитанным Кумаховым и др. [8], средним значением проекции пробега 30 кэВ иона C^+ в Si . Кроме того, на осевых спектрах имплантированных кристаллов надежно проявляются "хвосты" дефектов, распространяющихся на глубине более 3000 \AA^0 .

Рассматривая случайные спектры обратного рассеяния, необходимо обратить внимание на характерные для имплантации больших интегральных потоков ионов изменения в области больших номеров каналов, которые уже отмечались нами ранее [9]. Наблюдаемое уменьшение выхода на спектрах имплантированных кристаллов по сравнению с выходом исходного кристалла, еще более проявляющееся при термических отжигах, позволяет получить достоверную информацию об изменениях в составе имплантированного слоя матрицы, в ряде случаев также о степени замещения узлов матрицы атомами внедренной примеси.

Следует отметить также, что приподнятия на спектрах в области I23 и I10 каналов свидетельствуют о появлении в имплантированных кристаллах после отжига больших количеств кислорода и азота. Ниже этот факт частично обсуждается.

Б. Профили дефектов.

Переходя к обсуждению профилей дефектов (рис.2), обратим внимание на принципиально отличные изменения в них, происходящие при термической обработке кристаллов, имплантированных при температурах, отличающихся лишь на 50°C . Так, отжиг при 850°C приводит, как это логично было ожидать, к уменьшению концентрации дефектов в области максимума в обоих случаях (кривые 2 на рис.2 а и б). С повышением температуры отжига до 1000°C наблюдается значительный рост дефектности в приповерхностной области, характерный для имплантации при различных температурах. Однако в области пика дефектов при 700°C имплантации, в отличие от имплантации при 750°C , происходит рост концентрации дефектов. Объяснить рост дефектности в приповерхностной области можно следующим образом. Как следует из анализа спектров обратного рассеяния (рис.1) в обл. I10-I20 канала, после термообработки при 850°C (в атмосфере сухого азота) в имплантированные кристаллы активно диффундирует кислород, который, по-видимому, находится еще в химически несвязанном состоянии. Во время отжига с температурой 1000°C кислород соединяется с кремнием, образуя химическое соединение - двуокись кремния. Пленка SiO_2 проявляется в виде ступеньки в области I90-I94 канала, ее толщина оценивается от 150 до 250 \AA . При этом,

надо полагать уже после отжига, в имплантированный слой диффундирует еще значительное количество кислорода. Все это вызывает наблюдаемое увеличение выхода в спектрах обратного рассеяния на самой поверхности. Отмеченное выше различие в поведении профилей объяснить сложнее. Одно из возможных объяснений заключается в следующем. Во время имплантации при температуре 750°C синтезируются кристаллы карбида кремния, которые при отжигах растут и упорядочиваются в структурном отношении, с эпитаксиальной ориентацией к матрице. Температура имплантации 700°C , по-видимому, недостаточна для образования кристаллитов. Поэтому термообработка при 850°C , активируя диффузионные процессы атомов углерода и кремния, способствует в равной мере, с одной стороны, восстановлению поврежденной матрицы, а с другой образованием кристаллитов SiC , которые во время отжига при 1000°C формируются в квазислое, который в структурном отношении может быть слабо согласован с матрицей. Если это так, то из-за граничных напряжений между уже восстановленной, а значит более совершенной матрицей, и квазислоем SiC должен возрасти осевой выход на спектре обратного рассеяния, что и наблюдается.

Сравнивая нарушения состава матрицы при отжиге кристаллов, имплантированных при различных температурах, заметим, что они также различаются как по величине, так и по глубине расположения. При 700°C имплантации эти нарушения лежат в более тонком слое и этот факт не противоречит вышеизложенным рассуждениям относительно процессов, протекающих при отжигах в кристаллах, имплантированных при различных температурах.

Электрограммы, полученные от кристаллов после имплантации, не показали рефлексов SiC , по-видимому, из-за экранировки слоем кремния. Вместе с тем, на них хорошо различимы вытянутые рефлексы от крупных кристаллитов, имеющих структуру чешуек толщиной $\sim 20 \text{ \AA}$ и линейными размерами до 150 \AA , а также кольца от поликристаллических включений кремния. Картина проявляется отчетливо при 750 C и улучшается с ростом дозы ионов углерода.

В. Распределение атомов углерода.

Достаточно сложным представляется распределение имплантированного в кремний углерода, а также изменение распределения при термообработке. В отличие от имплантации при комнатной температуре [5], в данном эксперименте имеется явно выраженный двухпиковый профиль с сравнимой концентрацией углерода в пиках, расположенных на глубине 700 и 2500 Å⁰ при 700 С имплантации и 250 и 1800 Å⁰ при 750 С имплантации (рис. 3 а и б). Появление второго пика определенно связано с каналированием ионов углерода при высокотемпературной имплантации. Причем доля каналированных ионов составляет ~0,3 при 700 С и ~0,5 при 750 С. Глубина залегания основного максимума меньше теоретически оцениваемой [8], что наш взгляд, определяется распылением поверхности облученных кристаллов. При температуре 750 С распыление значительно сильнее, чем при 700 С, об этом свидетельствует различие в глубине залегания пиков углерода. Термический отжиг вызывает перераспределение имплантированной примеси.

В облученном при меньшей температуре кристалле после отжига при 850 С уменьшается содержание атомов углерода на поверхности и выравнивается концентрация между двумя максимумами (кривая 2, рис. 3а). Отжиг при 1000 С приводит к тому, что на поверхности углерод не чувствуется, а выделяется область основного пика с концентрацией ~1,6 x 10²² см⁻³.

Иначе изменяется профиль распределения углерода, внедренного в кремний при 750 С. Во-первых, при термообработке незначительно изменяется концентрация углерода в основном пике. Во-вторых, происходит смещение всего профиля в область больших глубин. Однако, это смещение представляется кажущимся. На поверхности имплантированного кристалла при отжигах нарастает пленка двуокиси кремния при химическом взаимодействии атомов кремния с кислородом, присутствие которого в имплантированном слое обсуждалось выше. Аналогичные процессы протекают в кристалле, имплантированном при 700 С, однако не так активно. Например, количество кислорода, замеченного в облученных образцах после отжигов, гораздо большее в тех образцах,

которые облучались при 750 С.

Концентрация углерода во втором пике уменьшается при отжигах за счет миграции атомов в глубь кристалла.

4. Заключение.

Таким образом, при исследовании высокотемпературной имплантации углерода в кремний установлено, что профиль распределения внедренных атомов углерода имеет двухпиковый характер. Атомы углерода основного максимума распределены в слое толщиной до 1200 \AA , что находится в соответствии с теоретическими оценками. Второй максимум, образован атомами углерода, которые попадали в режим каналирования при внедрении, расположен на глубине от 2000 до 3000 \AA .

Степень разупорядочения кремния, облученного ионами углерода при температуре 700-750 С, незначительна. Поверхность имплантированного кремния состоит из смеси поликристаллов с крупными монокристаллическими блоками, сохраняющими ориентацию матрицы.

Процессы кристаллизации фазы карбида кремния чувствительны к изменению температуры имплантации, причем температура 750 С более предпочтительна для синтеза фазы карбида кремния во время внедрения, чем 700 С.

В результате отжига до 1000 С наблюдается изменение состава имплантированного слоя, которое происходит как за счет изменения концентрации атомов матрицы, так и из-за перераспределения внедренных атомов углерода, что свидетельствует о продолжающихся интенсивных процессах миграции атомов.

В имплантированных кристаллах, подвергнутых термообработке в атмосфере сухого азота, наблюдается появление значительного количества кислорода, который вступает в химическую связь с атомами кремния, образуя на поверхности пленку двуоксида кремния.

Наряду с кислородом, после термообработки в имплантированных кристаллах обнаруживается обогащение поверхности азотом.

Л И Т Е Р А Т У Р А

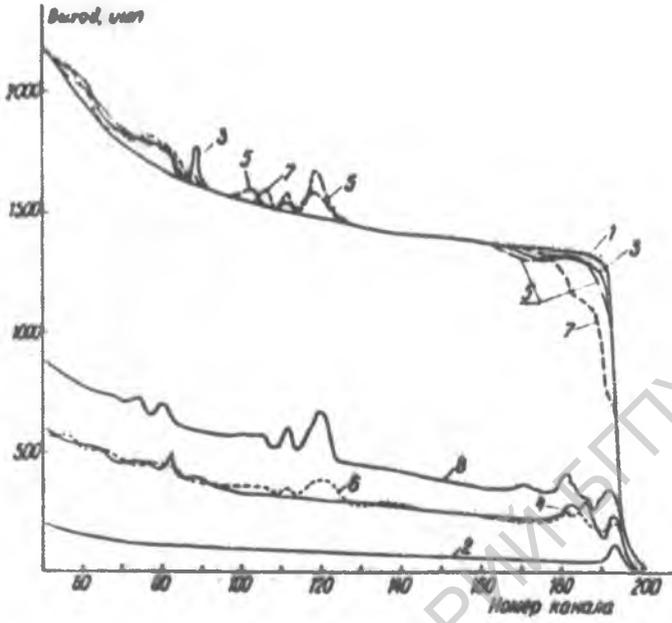
1. Баранова Е.К., Демков И.Д., Старинин К.В., Стрельцов Л.Н., Хайбуллин Н.Б. Доклады АН СССР, 200, в 4, 869 (1971).
2. Borders, J.A., Picraux, S.T., Beezhold, V.
Appl. Phys. Letters, 18, Nr. 11, 509 (1971)
3. Беляя И.М., Гетц Г., Гуманский Г.А., Соловьев В.С., Ташликов И.С., Тшиков В.С. Международное рабочее совещание по ионному легированию полупроводников, Будапешт, 1975. Издательство ЦФНИ ВАН, 462 (1976).
4. Акимченко И.П., Еиселева Б.В., Краснопевцев В.В., Милютин Д.В., Турьянский А.Г. Международное рабочее совещание по ионному легированию полупроводников. Будапешт, 1975. Издательство ЦФНИ ВАН, 522 (1976).
5. Гуманский Г.А., Ташликов И.С. Труды УИ Всеобязного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. Издательство МГУ, Москва, 231 (1976).
6. Edelman, F.L., Kuznetsov, O.N., Lezheiko, L.V., Lubopytova, E.V., Rad. Eff. 29, 13 (1976)
7. Gartner, K., Nehl, K.
Wiss. Ztsch. Friedrich-Schiller-Univ., Jena, Math.-Nat. R. 22. Jg., Nr. 1/2, 257 (1973)
8. Кумахов М.А., Муралев В.А., Аверьянов Е.Г., Симонов В.А., Харкин Л.П. Депонирована ВИНТИ, в 700-75 (1975).
9. Гетц Г., Гуманский Г.А., Комаров Ф.Ф., Ташликов И.С., Тшиков В.С., Швабе Ф. Труды УИ Всеобязного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с монокристаллами. Издательство МГУ, Москва, (1977).

Подписи к рисункам.

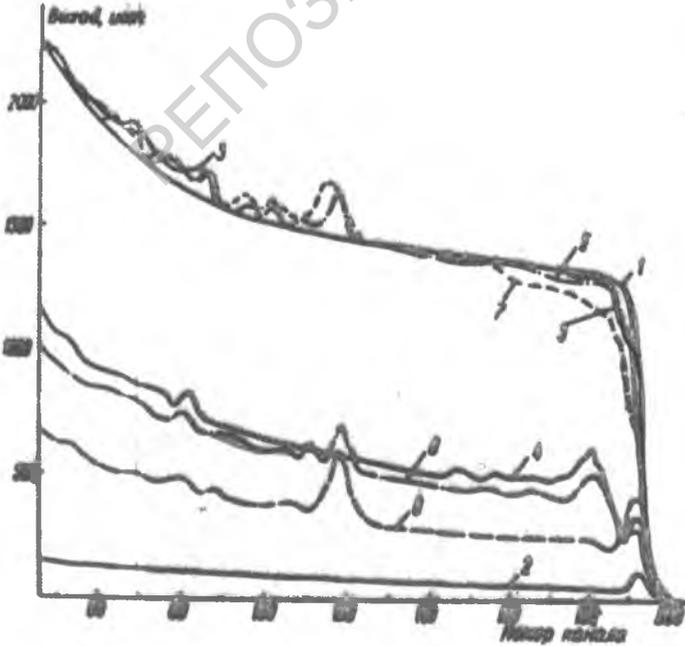
Рис. 1. Спектры ОР ионов He^+ ($E_0=1,4$ МэВ) от кристаллов кремния, имплантированных при температуре 700 С - а и 750 С - б. Спектры 1 и 2 - случайный и осевой исходного кристалла. Случайные и осевые спектры соответственно после имплантации - 3 и 4; после отжига при 850 С - 5 и 6; после отжига при 1000 С - 7 и 8.

Рис. 2. Пространственное распределение радиационных дефектов в кремнии, имплантированном при температуре 700 С - а и 750 С - б. После имплантации кривая - 1, после отжига при 850 С - 2, после отжига при 1000 С - 3.

Рис. 3. Пространственное распределение углерода, имплантированного в кремний при температуре 700 С - а, 750 С - б. После имплантации кривая - 1; после отжига при 850 С - 2 и 1000 С - 3.

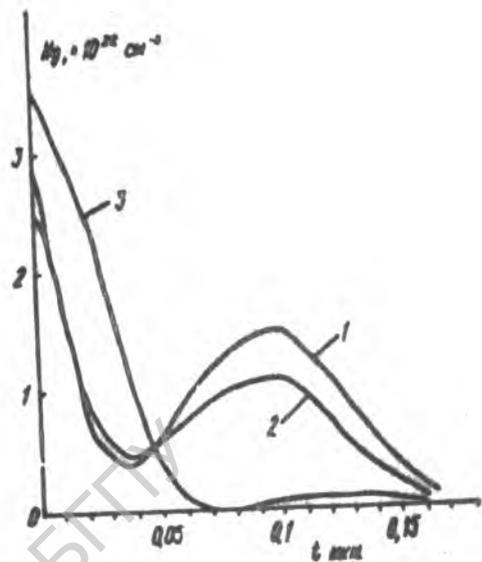
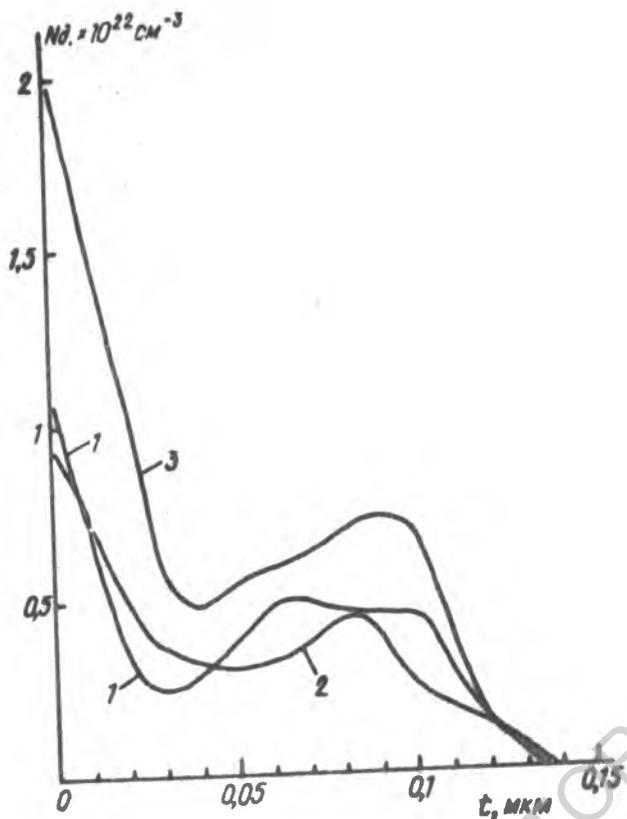


a



b

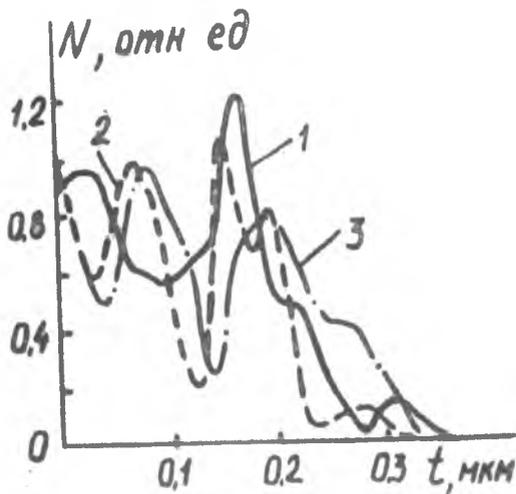
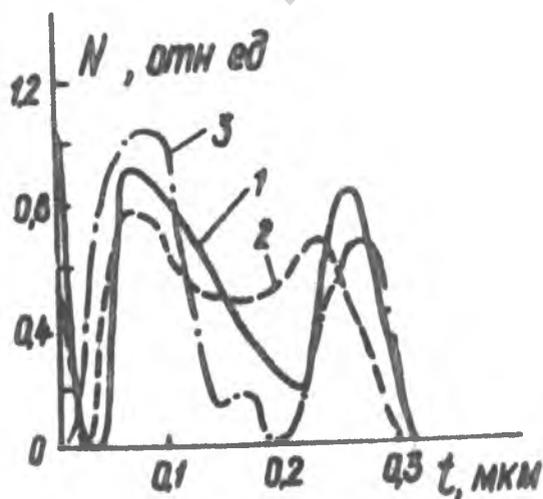
Рис. 1



а

б

Рис. 2



а

б

Рис. 3