

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-199

P14-97-199

В.Ф.Реутов, А.С.Сохацкий

ЭКСПРЕССНЫЙ МЕТОД ПЭМ-ИЗУЧЕНИЯ
СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
В ПОЛУПРОВОДНИКАХ
ВДОЛЬ ПУТИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods»

1997

ВВЕДЕНИЕ

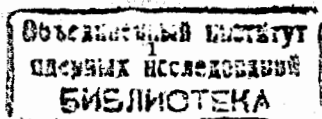
Понимание физических процессов образования, аннигиляции и агломерации радиационных дефектов является фундаментальной проблемой в использовании ионной имплантации в будущей полупроводниковой технологии. При этом постоянное стремление к уменьшению размеров полупроводниковых приборов требует более точного предсказания распределения радиационных дефектов и имплантируемой примеси вдоль пути пробега бомбардирующих частиц.

С этой целью используют различные физические (обратное резерфордское рассеяние, ВИМС и т.п.) и структурные (электронная микроскопия) методы изучения энергетических профилей радиационного повреждения в полупроводниках. Наиболее перспективным является так называемый метод "cross-section", позволяющий с помощью просвечивающего электронного микроскопа прямое изучение всего профиля структурных изменений в полупроводниках по всей длине пробега бомбардирующих ионов [1]. Однако при всей наглядности и информативности этот метод требует больших временных и экономических затрат при подготовке соответствующих объектов. Более того, длительный этап подготовки образца для данного метода "cross-section" (более суток) используется после облучения, что, естественно, значительно сдерживает получение необходимой экспрессной информации.

В настоящей работе описывается экспрессный метод изучения в просвечивающем электронном микроскопе структурных изменений в кремнии вдоль пути движения ионов непосредственно после облучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагаемый метод включает в себя следующие этапы: приготовление тонкой (толщиной около 0,2 мкм) пластинки с плоским краем — торцом; монтаж пластинки в коллиматорное мишенное



устройство; облучение пучком ионов, перпендикулярным к плоскости торца пластинки; ПЭМ-анализ.

Трудоемкость на каждом этапе сведена до минимума, и полное время подготовки образца составляет не более двух часов. Тонкие монокристаллические пластины приготавливаются в течение одного часа с помощью специальной струевой химической полировки с использованием прибора "Микрон" [2]. Размеры пластинки выбирались удобными для манипуляции с ними в процессе облучения и ПЭМ-анализа.

Пластинки кремния зажимались между двумя металлическими пластинами, служащими одновременно коллиматором для бомбардирующих частиц. Сборка ориентировалась с помощью наклонного устройства таким образом, чтобы бомбардируемая кристаллографическая плоскость торца тонкой пластинки была перпендикулярна пучку частиц.

Естественно полагать, что при таком облучении не все ионы, вошедшие в плоскость торца тонкой пластинки, останутся в образце. Поэтому профили радиационного повреждения (концентрации дефектов и примесных атомов) вдоль пути пробега ионов могут отличаться от случая облучения массивного образца. Для того чтобы учесть влияние толщины пластинки на изменение профилей повреждения и легирования, разработана машинная программа, учитывающая все события (которые вычисляются по программе TRIM-95), происходящие только в объеме образца, ограниченном его толщиной и длиной пробега заданного иона.

На рис. 1 а,б приведены рассчитанные распределения концентрации радиационных дефектов и имплантированных ионов по глубине в тонкой пластинке кремния для заданных величин ее толщины. Образцы облучались ионами гелия с энергией 16,9 кэВ до дозы $1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. На рисунке видно, что при толщинах пластинки около $3R_p$ ($R_p = 220 \text{ нм}$ — проективный пробег ионов He с энергией 16,9 кэВ в кремнии), профили радиационных дефектов и легирования соответствуют профилям в массивном образце. При толщине тонкой пластинки кремния, равной 150 нм, (она хорошо прозрачна для электронов с энергией 100 кэВ в ПЭМ), концентрация гелия в ней в 2,8 раза, а дефектов (в максимуме распределения) в 1,5 раза меньше, чем в случае облучения массивного образца. Таким образом, зная конкретную толщину тонкой пластинки кремния (по интерференционным линиям в оптическом микроскопе или

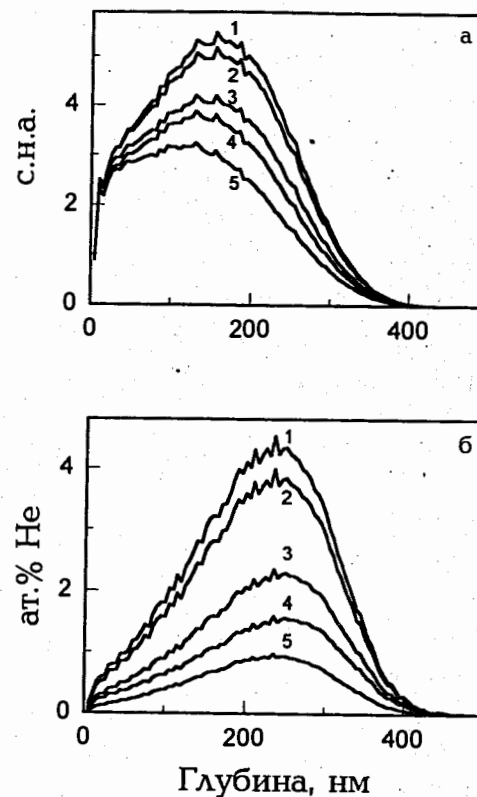


Рис. 1. Изменение профилей концентраций дефектов (а) и атомов гелия (б) в зависимости от толщины тонкой пластины Si, облученной ионами He с энергией 16,9 кэВ до дозы $1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Толщина пластин: 1 — 1200 нм (массивный образец); 2 — 500 нм; 3 — 200 нм; 4 — 150 нм; 5 — 100 нм

по прямому измерению в ПЭМ), можно рассчитать реальные профили радиационных дефектов и легирующих атомов для известной дозы облучения образца.

В общем случае при использовании данной методики для различных энергий и типов ионов полезно задаться критерием толщины пластинки, при которой ее можно считать макрообразцом. Если при увеличении толщины вдвое количество дефектов увеличится не более чем на 5%, то этот образец можно считать макрообразцом. Естественно, толщина пластинки, начиная с которой она отвечает условиям макрообразца, зависит от величины проективного пробега частиц (R_p). Как показали расчеты, в большинстве случаев для ионов средних масс и энергий десятки – сотни кэВ тонкая пластинка считается макрообразцом, если ее толщина более $4R_p$. Обычно для ускоряющего напряжения в ПЭМ, равном 100 кВ, "прозрачным" считается объект из кремния толщиной $0,2 \pm 0,3$ мкм. Таким образом, для бомбардирующих частиц, имеющих проективный пробег в пределах 50 ± 60 нм, данные образцы можно считать макрообразцами. Для ионов с проективными пробегами более 50 нм необходимо проводить расчеты профилей радиационной повреждаемости, соответствующие данной толщине тонкой пластинки.

Для иллюстрации данного метода на рис. 2–5 приведены характерные электронномикроскопические снимки структурных изменений в тонких пластинках кремния, облученные в торец различными ионами.

На рис. 2 приведены структурные изменения в кремнии по длине пробега ионов C^+ с энергией 40 кэВ при дозах облучения $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (а) и $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (б). Для толщины пластинки, равной 150 нм, что практически эквивалентно длине пробега ионов C^+ ($R_p = 110$ нм), на рис. 2 (в) приведены расчетные профили концентраций радиационных дефектов и атомов углерода для дозы облучения $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Как видно из рис. 2, при дозе $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ повреждаемость вдоль пути пробега ионов C^+ характеризуется скоплениями радиационных дефектов, а при дозе $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ — полной аморфизацией всего поврежденного слоя. Заметим, что рассчитанный уровень повреждений для образца толщиной 150 нм соответствует дозе $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

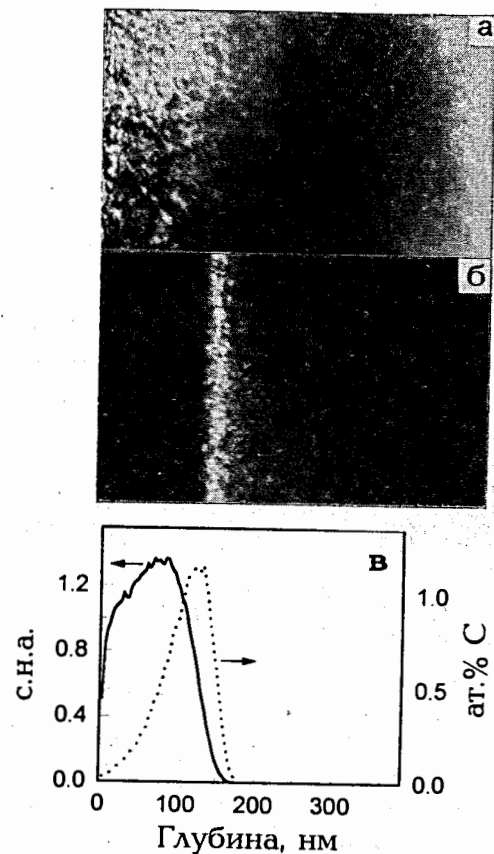


Рис. 2. Скопления радиационных дефектов (а) и аморфная зона (б) вдоль пути пробега ионов C^+ с энергией 40 кэВ, после облучения до доз $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Расчетные профили концентрации дефектов и атомов углерода для дозы облучения $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при толщине образца, равной 150 нм (в)

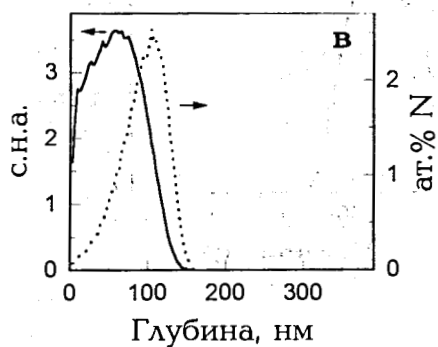
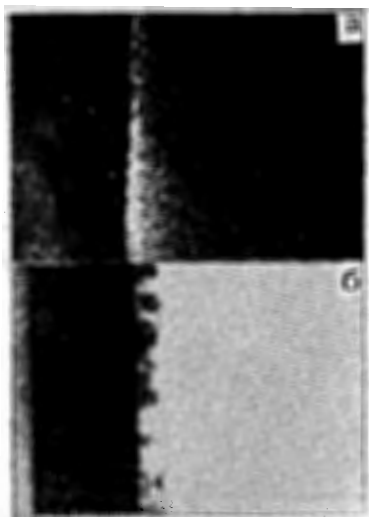


Рис. 3. а) Аморфный слой в Si по длине пробега ионов N^+ с энергией 40 кэВ (доза $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$). б) Поликристаллический слой в зоне легирования азотом, образованный в результате послерадиационного отжига при 900°C . в) Расчетные профили концентраций дефектов и атомов азота при толщине образца, равной 150 нм

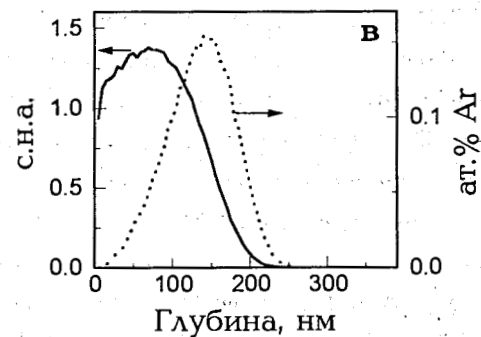
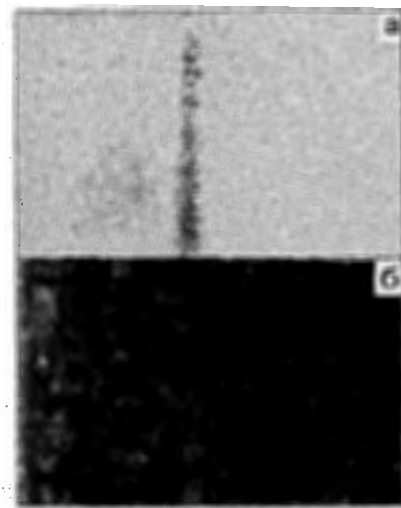


Рис. 4. а) Аморфный слой в Si по длине пробега ионов Ar^{9+} с энергией 16,9 кэВ/заряд (доза облучения 10^{15} см^{-2}). б) Дислокационные накопления в рекристаллизованном при отжиге (1000°C) аморфном слое. в) Расчетные профили концентраций дефектов и атомов аргона при толщине образца, равной 150 нм

На рис. 3 приведены результаты ПЭМ-исследования тонкой пластины кремния, облученной ионами N^+ с энергией 40 кэВ до дозы $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ (рис. 3а) и оттоженной при 900°C в течение 5 мин в вакууме (рис. 3б). После облучения имеет место формирование аморфного слоя по всей длине пробега ионов. В результате послерадиационного отжига данного образца в зоне легирования азотом образовался слой поликристаллического кремния, отстоящего от поверхности на глубину 50 нм.

На рис. 4 а,б приведены примеры изменения структуры тонкой пластинки кремния вдоль направления движения ионов Ar^{8+} с энергией 16,9 кэВ/заряд после облучения дозой 10^{15} см^{-2} (а) и оттоженной при 1000°C в течение 5 мин (б). Видно, что при соответствующих уровнях повреждения (рис. 4в) в пределах длины пробега ионов аргона формируется аморфный слой. В районе границы аморфного слоя с кристаллическим кремнием наблюдается область размером около 40 нм с т.н. "дефектами конца пробега". В результате рекристаллизации аморфного слоя в процессе отжига при 1000°C в нем образуется кристаллический слой с высокой плотностью дислокаций. При этом, несмотря на высокую (0,15 ат.%) концентрацию атомов инертного газа, образования аргоновой пористости не наблюдается.

И, наконец, на рис. 5 приведен пример применения облучения в торец тонкой пластинки кремния высокоэнергетичными (210 МэВ) ионами Кг, который иллюстрирует случай формирования ядерных треков (рис. 5а) в области с высокой плотностью выделенной энергии (9,8 кэВ/нм) (рис. 5б).

Итак, вышеприведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что в условиях облучения заряженными частицами в торец тонкой пластинки кремния формируются качественно те же структурные особенности (скопления дефектов, аморфные слои, дефекты конца пробега, ядерные треки и т.п.), что и в случае облучения массивных образцов. Отметим, что интервалы доз облучения для формирования этих особенностей в тонкой пластине практически аналогичны случаю облучения массивных образцов.

С целью более корректной количественной корреляции структурных особенностей в тонкой пластинке и в массивном образце

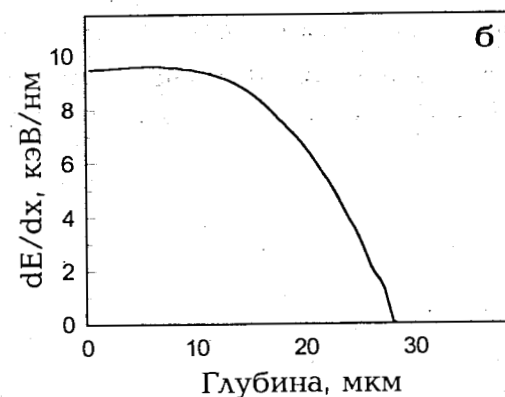


Рис. 5. а) Ядерные треки в тонком монокристаллическом Si, облученном ионами Кг с энергией 210 МэВ.

б) Изменение ионизационных потерь энергии ионов Кг с энергией 210 МэВ вдоль пути их движения

необходимо проведение специальных экспериментов. Тем не менее, учитывая достаточно высокую эффективность, простоту и доступность данного метода, его можно успешно использовать в научных исследованиях, требующих прямой информации о структурных изменениях в области пробега бомбардирующих ионов, в зависимости от параметров бомбардирующих частиц и условий облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sinkle S.J., Sindelar R.L. Preparation of ion-irradiated foils for cross-section analysis. Nucl. Instrum. and Meth. B16 (1986) p.154-162.
2. Реутов В.Ф., Багаева Н.В., Подилько А.Н. Устройство "Микрон" и способ приготовления объектов для ПЭМ из высокорadioактивных материалов. ИЯФ АН КазССР.Препринт 5-87, Алма-Ата, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 июня 1997 года.

Экспрессный метод ПЭМ-изучения структурных изменений в полупроводниках вдоль пути движения заряженных частиц

Описывается экспрессный метод изучения в просвечивающем электронном микроскопе структурных изменений в кремнии вдоль пути движения ионов непосредственно после облучения.

Предлагаемый метод включает в себя следующие этапы: приготовление с помощью специальной струевой химической полировки тонкой (толщиной около 0,2 мкм) пластинки с плоским краем-торцом; облучение пучком ионов, перпендикулярным к кристаллографической плоскости торца пластинки; ПЭМ-анализ.

Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что в условиях облучения заряженными частицами в торец тонкой пластинки кремния формируются качественно те же структурные особенности (скопления дефектов, аморфные слои, дефекты конца пробега, ядерные треки и т.п.), что и в случае облучения массивных образцов.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.Г.Н.Флерова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1997

Перевод авторов

Rapid TEM Method for the Study the Structural Modifications in Semiconductors Along the Paths of Charged Particles

The present work outlines a rapid «cross-section» method which allows the investigation of samples immediately after irradiation.

The proposed method consists of the following steps: preparation of a thin (about 0.2 μm) wafer, e.g. Si, with a flat butt surface by the special chemical technique of jet polishing; irradiation with an ion beam so that the bombarded crystallographic butt surfaces of the thin wafers be oriented perpendicular to the particle beam; TEM-analysis.

The results of the experiments on thin Si wafers irradiated with an ion beam perpendicularly to their butt indicate that the structural features formed under such conditions (i.e. accumulations of defects, amorphous layers, end of range defects, nuclear tracks etc.) are similar to those formed in the irradiation of massive samples.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1997