

## ОБРАЗОВАНИЕ НОВОЙ ФАЗЫ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ИОНОВ МОЛЕКУЛЯРНОГО И АТОМАРНОГО АЗОТА В КРЕМНИЙ

Е. Я. Черняк

Синтез пленок нитрида кремния путем имплантации высоких доз ионов молекулярного или атомарного азота в пластины монокристаллического кремния исследовался во многих работах [1-4], но тем не менее представляет интерес с точки зрения моделирования твердофазных реакций, стимулированных ионным облучением.

В настоящей работе исследовался процесс формирования нитридной фазы при внедрении в кремний ионов молекулярного и атомарного азота. В качестве мишени использовались пластины монокристаллического кремния КЭФ-2 и КДБ-10 с ориентацией (111). Имплантация осуществлялась при ускоряющем напряжении 12.5 кВ. Плотность тока составляла  $\sim 20$  мкА·см<sup>-2</sup>. Температура подложки не превышала 600 °С. Остаточное давление в вакуумной камере не превышало  $10^{-6}$  Па и достигалось безмасляными средствами откачки. В процессе имплантации постоянно измерялся коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии ( $K_{\text{визэ}}$ ) из мишени.

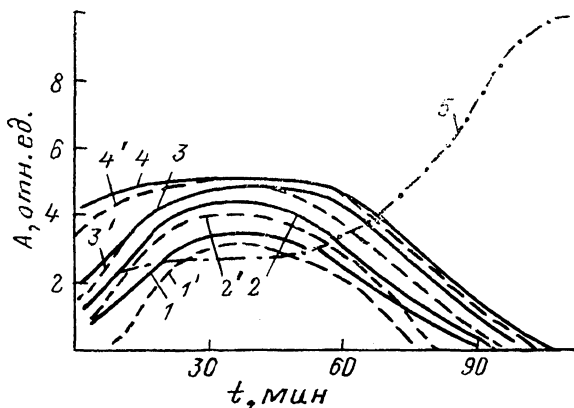


Рис. 1. Концентрационные профили послойного оже-анализа.

1-4 — профили азота при внедрении молекулярных ионов с дозами  $2 \cdot 10^{16}$ ,  $4 \cdot 10^{16}$ ,  $6 \cdot 10^{16}$ ,  $1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> соответственно; 1'-4' — профили азота при внедрении атомарных ионов с соответствующими дозами; 5 — профиль концентрации кремния.

Из моделирования профиля распределения атомарных ионов азота с энергией 12.5 кэВ известно, что слой кремния с имплантированными ионами азота простирается приблизительно до 100 нм [1]. Профиль распределения имеет обычную форму с максимумом, расположенным вблизи поверхности. Однако можно предположить, что комбинация эффектов имплантации, распыления поверхности и радиационно-стимулированной диффузии, сопряженной с реакцией фазообразования на фронте образующейся фаз, может привести к образованию плоского профиля, простирающегося от поверхности на глубину, значительно большую, чем можно ожидать из теории побегов ионов [5].

Кроме измерения *in situ*  $K_{\text{визэ}}$  проводился послойный оже-анализ, измерялась скорость травления пленок в 30%-ном растворе HF и коэффициент преломления в зависимости от толщины пленки.

Профили распределения азота и кремния снимались путем последовательного распыления ионно-имплантированного слоя ионами аргона с энергией 2 кэВ и одновременного измерения оже-спектров. Типичные кривые представлены на рис. 1 для различных доз внедрения.

Из кривых зависимости  $K_{\text{визэ}}$  от дозы внедрения рис. 2 для молекулярных и атомарных ионов следует, что кинетика аморфизации и последующего формирования нитридной фазы в двух рассмотренных случаях сильно отличается. При внедрении молекулярных ионов изменение  $K_{\text{визэ}}$  начинается уже при дозе  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> и практически заканчивается, достигая максимальной величины при дозе  $2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup>. Внедрение атомарных ионов азота не изменяет  $K_{\text{визэ}}$  вплоть до дозы  $9 \cdot 10^{16}$ — $10^{17}$  см<sup>-2</sup>, а все изменение вторичной эмиссии укладыва-

ется в области роста дозы до  $2-3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Анализ послойных зависимостей коэффициента преломления, скорости травления (рис. 3) и концентрационных профилей подтверждает, что механизмы фазообразования для случаев внедрения  $\text{N}_2^+$  и  $\text{N}^+$  различны.

Причина различия состоит, по-видимому, в том, что при бомбардировке кристалла молекулярным ионом эффективность образования дефектов не просто удваивается, а за счет кооперативности явления усиливается многократно. Такое усиление процесса дефектообразования стимулирует протекание химической реакции образования нитридной фазы. Причем формирование фазы протекает в расширенной области, т. е. не только в максимуме плотности внедренных атомов, но и непосредственно в приповерхностной части кристалла, из которой имеет место выход вторичных электронов. В пользу такого механизма свидетельствует плавное нарастание  $K_{\text{визэ}}$ , начиная с достаточно малых доз  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

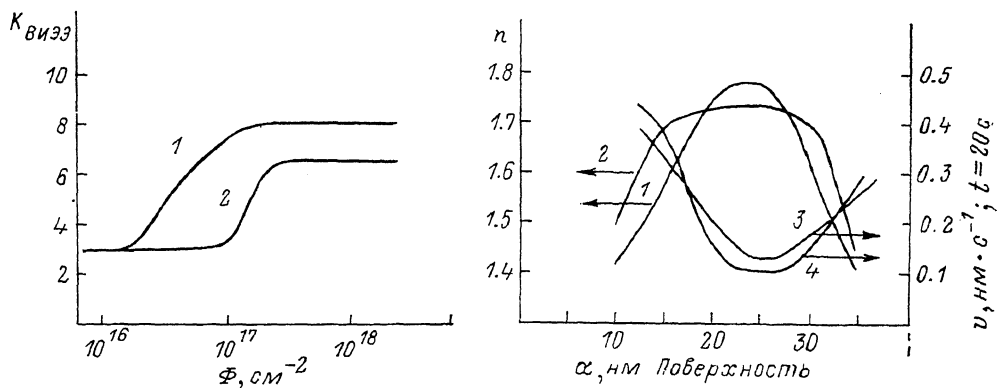


Рис. 2. Зависимость коэффициента вторичной ионно-электронной эмиссии от дозы внедрения  $\Phi$  для молекулярных ионов (1), атомарных ионов азота (2).

Ионный ток  $15 \text{ мкА/см}^2$ .

Рис. 3. Слойные зависимости коэффициента преломления  $n$  (1, 2) и скорости травления  $v$  (3, 4).

1, 3 — молекулярные ионы; 2, 4 — атомарные ионы.

Здесь необходимо отметить, что  $K_{\text{визэ}}$  недостаточно чувствителен к изменению кристаллической структуры объекта [6], и поэтому почти трехкратное увеличение  $K_{\text{визэ}}$  сопряжено в первую очередь с изменением химического состояния приповерхностной области кристалла.

Сравнительно резкое увеличение  $K_{\text{визэ}}$  при внедрении атомарных ионов обусловлено не столько тем, что скорость атомарных ионов в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем у молекулярных, и поэтому величина их пробега в кристалле больше, чем у ионов из молекулы, сколько из-за формирования в глубине кристалла относительно резкого фронта нитридной фазы, движущегося к поверхности при насыщении объема азотом.

Концентрационные профили оже-анализа не дают истинного соотношения в кинетике процесса по причине некоторого сглаживания кривых при распылении ионами аргона. Кривые распределения коэффициента преломления и скорости травления нитридных слоев по глубине (рис. 3) подтверждают существование различия в механизме образования нитридной фазы при внедрении атомарных и молекулярных ионов азота в кремний.

Автор выражает благодарность А. А. Свентицкому за проведение послойного оже-анализа.

#### Список литературы

- [1] Thomas G. E., Beckers L. J., Habraken F. H. P. M., Kuiper A. E. T. // Appl. Phys. Lett., 1982. Vol. 41. N 1. P. 56—59.
- [2] Крузе Т. А., Тетельбаум Д. И., Шимова Э. В. // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1984. № 1. С. 15—19.

- [3] Лабунюв В. А., Литвинович Г. В. и др. // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1983. № 7 (180). С. 27—30.  
 [4] Roman Elisa, Riwan Richarad // Surf. Sci. 1982. Vol. 118. N 3. P. 682—696.  
 [5] Качурин Г. А., Степина Н. П. // ФТП. 1982. Т. 16. Вып. 7. С. 1152.  
 [6] Krebs K. U. // Vacuum. 1983. Vol. 33. N 9. P. 555—563.

Научно-исследовательский  
технологический институт  
Рязань

Поступило в Редакцию  
27 ноября 1990 г.  
В окончательной редакции  
12 мая 1991 г.

05

Журнал технической физики, т. 61, в. 10, 1991

© 1991 г.

## ИЗМЕРЕНИЕ СРОДСТВА К ЭЛЕКТРОНУ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

О. М. Артамонов, С. Н. Самарин

### Введение

Применительно к твердым телам понятие «сродство к электрону» используется обычно для описания энергетической диаграммы диэлектриков и полупроводников. В этом случае под сродством к электрону понимается энергетическое расстояние от уровня вакуума до дна зоны проводимости (рис. 1). Однако такое определение физической величины, не связанное с процессом, в котором она проявляется, и без уточнения способа ее измерения приводит к неоднозначности

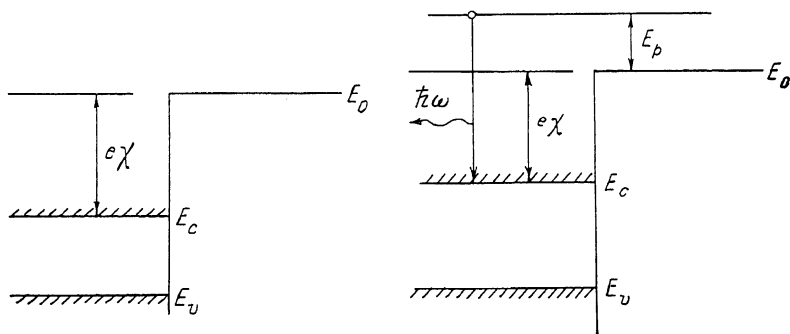


Рис. 1. Энергетическая диаграмма полупроводника.

Рис. 2. Энергетическая диаграмма, поясняющая принцип измерения сродства к электрону полупроводника.

этого понятия. Вместе с тем во многих физических процессах (например, при протекании тока сквозь слоистую структуру) важной характеристикой твердого тела является величина энергии, которая выделяется при релаксации электрона с уровня вакуума на наименьшее незаполненное энергетическое состояние в твердом теле. Очевидно, именно эту характеристику следует называть сродством к электрону твердого тела  $e\chi$  (по аналогии с определяемой таким образом в атомной физике величиной сродства к электрону атомов и молекул).

Знание о величине сродства к электрону твердых тел необходимо при подборе материалов для формирования полупроводниковых сверхрешеток и различных гетероструктур.

До недавнего времени не существовало адекватного способа измерения сродства к электрону твердых тел. Информация, получаемая об этой характеристике из фотоэмиссионных данных с использованием значения ширины запрещенной