

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОВОДЯЩИХ СЛОЕВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ БОРА И ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕМ ОТЖИГЕ

Калягин М. А., Стриковский М. Д.

Исследована динамика формирования слоев  $p$ -Si при облучении поверхности кремния ( $T=600$  °C) мощными импульсными потоками эрозивной лазерной плазмы бора (В). Обнаружен эффект радиационного ускорения диффузии В в глубь Si. Исследована динамика легирования облученных структур при отжиге. Установлен ряд особенностей легирования Si из сверхтонкого пленочного источника, связанных с влиянием слоя естественного оксида кремния и атмосферы отжига. Определена зависимость поверхностной концентрации носителей от дозы облучения.

В предыдущих статьях [1, 2] по исследованию взаимодействия эрозивной лазерной плазмы с поверхностью твердого тела приведены данные о процессах, сопровождающих облучение кристаллов кремния плазмой фосфора и мышьяка. Было показано, что взаимодействие энергетичных (100—1000 эВ) частиц лазерной плазмы Р и As с Si вызывает радиационно-ускоренную диффузию (РУД) частиц плазменного потока в глубь кристалла и в приповерхностной области Si формируются сильно легированные слои  $n$ -типа.

В настоящей работе для определения возможности создания слоев  $p$ -типа методом лазерно-плазменного легирования исследовано воздействие на поверхность Si плазмы бора. Схема эксперимента аналогична приведенной в [3]. Подложками служили химически очищенные пластины Si КДБ-20 (111), мишенью — таблетка сплавленного элементарного бора. Остаточное давление воздуха в камере  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст., температура подложки 600 °C. Скорость подачи бора составляла 0.14 Å за импульс. При этом импульсная плотность плазменного потока была  $\sim 2 \cdot 10^{19}$  см $^{-2}$ .с $^{-1}$ . Распределение носителей в Si после облучения определялось методом послыонного травливания с измерением слоевого сопротивления и коэффициента Холла после каждого шага.

На рис. 1 (см. вставку) приведено распределение носителей в Si, полученное при дозе облучения  $\Phi=1.5 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$ . Видно, что поверхностная концентрация бора совпадает с предельной растворимостью при 600 °C [4], глубина легирования  $\sim 500$  Å. Полученный профиль не является результатом чисто термической диффузии, так как коэффициент диффузии В в Si при 600 °C очень мал. Очевидно, проникновение примеси в кристалл стимулировалось радиационными дефектами. Небольшая глубина легирования объясняется ограничением времени РУД растущей пленкой бора, поскольку нет реиспарения бора с поверхности подложки из-за низкого давления его паров.

Изучение взаимодействия низкоэнергетичной плазмы различных веществ с Si показало сильную зависимость результата взаимодействия от типа облучающих частиц. При облучении Si плазмой сурьмы глубина легирования не превышала 200 Å из-за низкого коэффициента диффузии Sb в Si и высокой скорости распыления подложки [1], т. е. за короткое время устанавливался режим, когда скорость движения фронта легирования сравнивалась со скоростью травления поверхности. С точки зрения времени РУД, облучение фосфором занимает промежуточное положение между В и Sb, так как скорость

распыления Si фосфором меньше, чем у Sb, а давление паров больше, чем у В. Исследование движения фронта легирования при облучении Si бором показало, что распределение примеси практически не меняется для доз, больших  $10^{16}$  см $^{-2}$ , т. е. пленка толщиной  $h=10$  Å защищает поверхность от воздействия энергетических частиц. Оценка эффективного коэффициента диффузии В дает величину  $\sim 10^{-9}$  см $^2$ /с. Это на порядок меньше полученного в аналогичных условиях коэффициента диффузии фосфора [1], что согласуется с отношением их равновесных значений.

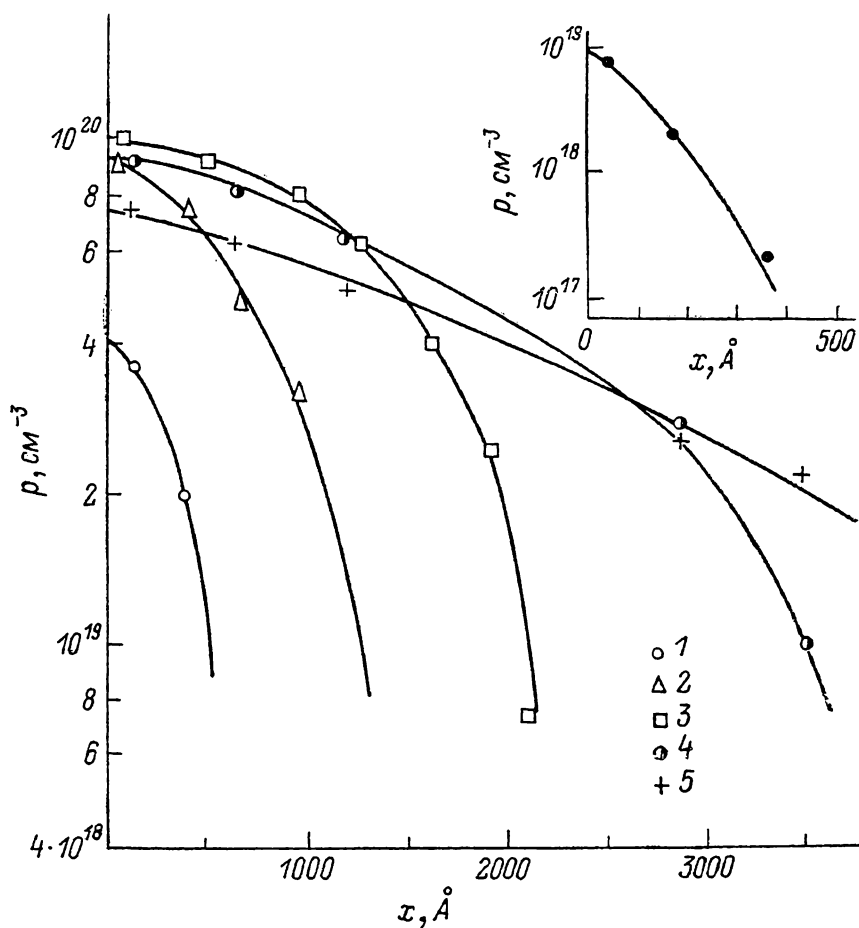


Рис. 1. Динамика распределения концентрации носителей в Si при изотермическом отжиге.  $\Phi=8 \cdot 10^{16}$  см $^{-2}$ ,  $T_{отж}=1000$  °С, Не. Время отжига, мин: 1 — 1, 2 — 5, 3 — 15, 4 — 45, 5 — 120. На вставке — распределение носителей в Si сразу после облучения.

Для увеличения концентрации бора в кремнии напыленные структуры подвергались высокотемпературному отжигу в гелии. В этом случае пленка бора являлась сверхтонким легирующим источником. На рис. 1 приведены распределения носителей для различных времен отжига, а на рис. 2 — зависимость поверхностной концентрации носителей от времени отжига для пленок различной толщины. Видно, что процесс диффузии из тонкого источника, состоящего из элементарного бора, имеет ряд особенностей.

1. Обнаруживается существенное влияние слоя естественного окисла кремния на процесс диффузии, которое проявляется в увеличении времени установления максимальной поверхностной концентрации примеси. Изменение толщины барьерного слоя напылением дополнительных пленок SiO $_2$  толщиной 10—50 Å существенно увеличивало время задержки.

2. Рост  $p_0$  со временем отжига для пленок бора толщиной менее 80 Å прекращается на уровне, не достигающем предельной растворимости, хотя слоевая

концентрация В в Si составляет при этом лишь  $\sim 2\%$  от количества примеси в источнике. Обнаруженная зависимость динамики  $p_0$  от начальной толщины пленки В неожиданна, так как элементарный бор при  $T=1000^\circ\text{C}$  практически не испаряется.

3. Распределения  $p(x)$  на стадии уменьшения  $p_0$  не имеют градиентов, соответствующих уходу бора из Si к поверхности.

Для определения изменения общего количества бора и выяснения механизма, приводящего к зависимости  $p_0(h)$ , образцы до и после отжига в He исследовались на лазерном микрозондовом масс-анализаторе LAMMA-1000. Измерения показали уменьшение общего количества бора в процессе отжига. Скорость его ухода с поверхности при  $1000^\circ\text{C}$  составила  $\sim 5 \text{ \AA}/\text{мин}$ . По-видимому, уход бора связан с его окислением остаточным кислородом среды

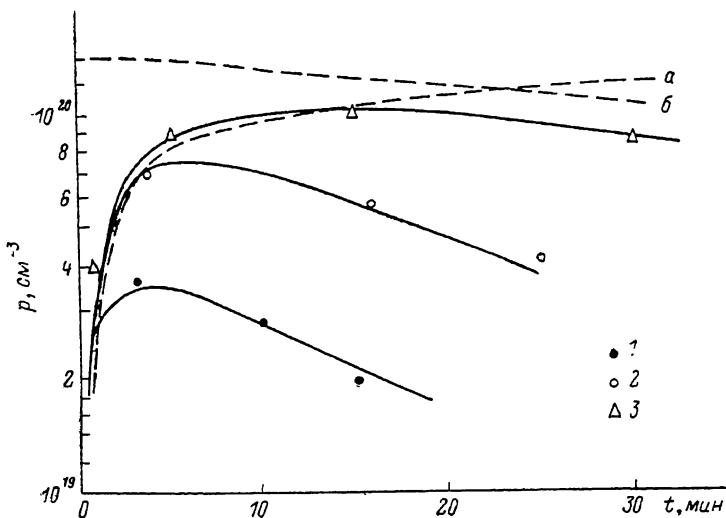


Рис. 2. Зависимость поверхностной концентрации носителей от времени отжига.

Начальная толщина пленки бора,  $\text{Å}$ : 1 — 5, 2 — 20, 3 — 80. Сплошные кривые — эксперимент, штриховые — расчет диффузии из неограниченного источника через барьерный слой (а) и ограниченного источника без стока (б).

отжига (гелий с содержанием  $\text{O}_2$  менее  $10^{-3}$ ) до  $\text{B}_2\text{O}_3$  и последующим испарением. Давление насыщенного пара  $\text{B}_2\text{O}_3$  при  $1000^\circ\text{C}$  составляет  $\sim 10^{-4}$  мм рт. ст. [5], что соответствует скорости испарения свыше  $100 \text{ \AA}/\text{мин}$ , т. е. в наших условиях скорость испарения бора определялась концентрацией кислорода в атмосфере. Это позволяет связать зависимость  $p_0(h)$  со скоростями испарения бора и его диффузии через  $\text{SiO}_2$ .

Исходя из проведенного анализа, можно качественно описать протекающие во время отжига процессы в рамках следующей модели. При отжиге на границе атмосфера—бор происходят окисление В и испарение  $\text{B}_2\text{O}_3$ , а на границе В— $\text{SiO}_2$  — диффузия бора в слой естественного окисла кремния и далее в кремний. Рассматриваемый процесс состоит из двух этапов. До момента полного испарения бора идет диффузия из неограниченного источника через барьерный слой. Этот случай проанализирован в [6]:

$$p_0(t) = p_1 \frac{mr}{m+r} \operatorname{erfc} \frac{x_0}{2\sqrt{D_1 t}}, \quad (1)$$

где  $p_0$ ,  $p_1$  — концентрации бора на границе  $\text{SiO}_2$ —Si в Si и  $\text{SiO}_2$  соответственно;  $m = p_0/p_1$  — коэффициент сегрегации;  $r = (D_1/D_2)^{1/2}$  — отношение коэффициентов диффузии бора в  $\text{SiO}_2$  и Si;  $x_0$  — толщина слоя  $\text{SiO}_2$ . Используя экспериментальные данные, из (1) можно оценить толщину барьерного слоя. Полученная величина  $x_0 \approx 14 \text{ \AA}$  несколько меньше толщины естественного окисла кремния, что может быть связано с имплантацией энергетических частиц лазерной плазмы в окисел и с приближенностью выражения (1), не учитывающего

движения фронта образующегося борного стекла. Рассчитанная в соответствии с (1) зависимость  $p_0(t)$  хорошо описывает начальный участок экспериментальных кривых (рис. 2). Моменты начала расхождения экспериментальных кривых для малых  $h$  и расчетной соответствуют времени испарения бора.

После испарения идет диффузия из ограниченного источника — легированного  $\text{SiO}_2$  (боросиликатного стекла). При этом на границе стекло—атмосфера возможны два условия: наличие сильного стока примеси в атмосферу [6] и отсутствие стока [7]. Сравнение расчетных кривых с экспериментальными показало, что реальная ситуация близка к случаю источника с изолированной поверхностью [7] (рис. 2):

$$p_0(t) = p_1 \frac{mr}{m+r} (1-\alpha) \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^{n-1} \operatorname{erf}\left(\frac{nl}{\sqrt{D_1 t}}\right),$$

где  $\alpha = (m-r)/(m+r)$ ,  $l$  — толщина стекла.

Это согласуется также и с видом распределений  $p(x)$ , не имеющих обратных градиентов (рис. 1).

Известно, что для прохождения диффузии В в Si необходимо присутствие кислорода [4]. В рассматриваемых условиях для создания локального источника примеси достаточно кислорода, содержащегося в слое естественного окисла кремния. Наличие  $\text{O}_2$  в атмосфере приводит лишь к окислению и испарению бора, а затем и к росту толщины окисла на кремнии.

Таким образом, исследования показали, что стимулированное радиационными дефектами легирование кремния из низкоэнергетичной эрозивной плазмы бора затруднено из-за реализации «самоизолирующегося» режима. Использование более мощного  $\text{CO}_2$ -лазера и, следовательно, более энергетичной плазмы может сделать этот процесс более эффективным [8]. Однако лазерное напыление пленок элементарного бора в качестве сверхтонкого источника примеси может быть использовано для прецизионного формирования мелкозалегающих слоев p-Si.

#### Список литературы

- [1] Гапонов С. В., Стриковский М. Д., Калягин М. А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. Т. 49. В. 4. С. 758—764.
- [2] Гапонов С. В., Калягин М. А., Стриковский М. Д. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 9. С. 1642—1648.
- [3] Гапонов С. В., Стриковский М. Д. // ЖТФ. 1982. Т. 52. В. 8. С. 1838.
- [4] Sorab K. Gandi // VLSI Fabrication Principles. J. Wiley and Sons. 1983. N. Y. P. 70—165.
- [5] Физико-химические свойства окислов. Справочник / Под ред. Г. В. Самсонова. М., 1978. С. 155—157.
- [6] Barry M. L., Olofsen P. // J. Electrochem. Soc. 1969. V. 116. N 6. P. 854—860.
- [7] Nagano K., Iwauchi S., Tanaka T. // Japan. J. Appl. Phys. 1968. V. 7. N 11. P. 1361—1367.
- [8] Silfvast W. T., Tell B. // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 38. N 10. P. 782—785.

Институт прикладной физики АН СССР  
Горький

Получена 24.11.1988  
Принята к печати 18.01.1989