

©1995 г.

ВЛИЯНИЕ КОНКУРИРУЮЩИХ ЦЕНТРОВ ПРЕЦИПИТАЦИИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПЛАНТИРУЕМОГО АЗОТА В Si ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗАХОРОНЕННЫХ СЛОЕВ

Г.А.Качурин, И.Е.Тыщенко, С.А.Тийс, А.Е.Плотников

Институт физики полупроводников

Сибирского отделения Российской академии наук,

630090, Новосибирск, Россия

(Получена 20 июня 1994 г. Принята к печати 22 августа 1994 г.)

Преципитация имплантируемого при 1000°С азота стимулировалась введением центров осаждения в результате предварительного облучения ионами N^+ или Ag^+ при более низкой температуре. Обнаружены существенные изменения в распределении преципитирующего азота в зависимости от условий предварительного облучения. Эффекты объяснены конкуренцией стоков для примесных атомов и точечных дефектов.

Еще в ранних работах [1-3] отмечалось, что при формировании ионным синтезом захороненных слоев нитрида и оксида кремния на начальных стадиях отжига новая фаза выделяется сразу на нескольких глубинах. После больших (стехиометрических) доз N^+ или O^+ длительные отжиги приводят к формированию единого сплошного слоя изолятора. В последние годы много усилий было направлено на ионный синтез с использованием достехиометрических доз. Связано это не только с желанием снизить радиационную нагрузку на кремний, но и с необходимостью создавать весьма тонкие структуры «кремний-на-изоляторе», перспективные для быстродействующих приборов и схем. Однако после имплантации достехиометрических доз единый захороненный слой в обычных условиях отжига не образуется. Новая фаза выделяется в виде отдельных преципитатов, причем ее распределение по глубине приобретает сложный характер с несколькими экстремумами [3-5]. Несоответствие между ожидаемым распределением азота и полученным после высокотемпературной имплантации N^+ отмечалось и в [6], где для стимулирования фазообразования в кремний на заданную глубину вводились центры преципитации бомбардировкой ионами Ag^+ . Относительно причин аномалий в распределениях высказывались разные предположения. В частности, авторы [3]

связывали их со стимулированной преципитацией внутри пиков смещений. В работах [4,5] аномалии объяснялись действием механизма Оствальда, приводящего к самоорганизации профиля с несколькими экстремумами. Цель данного сообщения — показать, что трансформации профилей распределения и появления на них нескольких экстремумов обусловлены, по-видимому, существованием нескольких предпочтительных для фазообразования мест и конкуренцией между ними.

Исследовалось поведение азота в кремнии при высокотемпературной имплантации $(2 \div 8) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ионов N^+ в подложки, содержавшие заранее введенные центры преципитации. Последние создавались предварительной имплантацией 10^{17} см^{-2} ионов N^+ либо $3 \cdot 10^{13} \div 1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ ионов Ag^+ при температурах облучения $T_i = 600$ и 800°C соответственно. Во всех случаях энергия ионов была 135 кэВ . Средние проективные пробеги и положение максимумов в распределении упругих потерь для ионов азота и аргона равнялись: $R_p^{\text{N}} = 0.32$, $R_p^{\text{Ar}} = 0.14$, $R_d^{\text{N}} = 0.24$, $R_d^{\text{Ar}} = 0.1 \text{ мкм}$. Согласно [6] центрами преципитации нитрида являются структурные нарушения (дислокационные петли), формирующиеся при «горячем» облучении [7]. Образцы исследовались с помощью электронной микроскопии поперечных срезов и оже-спектроскопии на установке LAS-2000. Послойное травление осуществлялось ионным распылением с шагом $10 \div 20 \text{ нм}$.

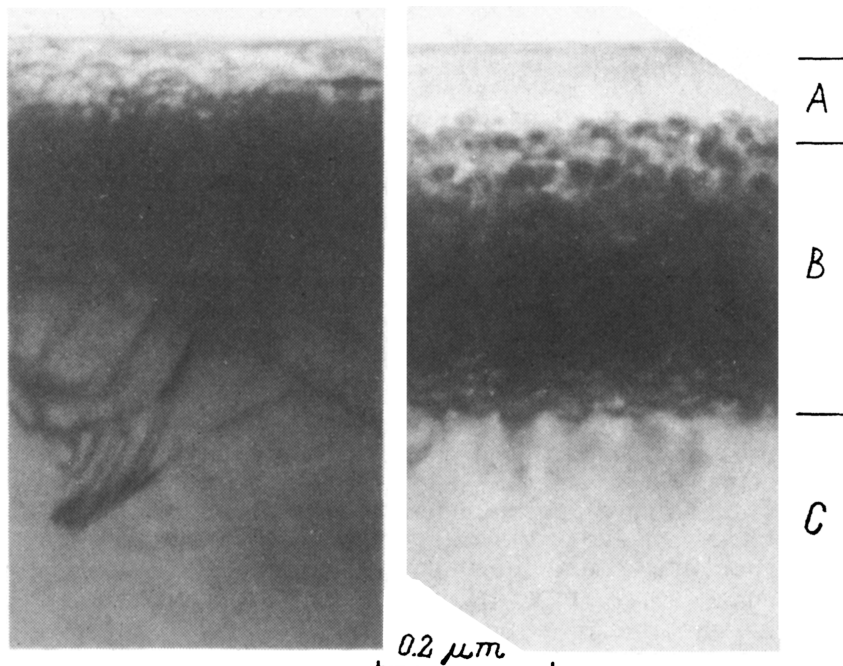


Рис. 1. Электронная микроскопия поперечных срезов образцов после высокотемпературной имплантации $8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ионов N^+ . Слева — без предварительного введения центров преципитации, $T_i = 850^\circ\text{C}$. Справа — преципитация стимулирована внедрением $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ионов N^+ при $T_i = 600^\circ\text{C}$, затем внедрение $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ионов N^+ при $T_i = 1000^\circ\text{C}$. А — отсеченный кремний, В — захороненный слой, С — подложка.

На рис. 1 приведены электронно-микроскопические снимки поперечных срезов образцов после высокотемпературного внедрения ионов N^+ в отсутствие и при наличии заранее созданных центров преципитации. Без центров преципитации темный контраст, соответствующий выделениям нитрида, весьма размыт. Максимум плотности расположен на глубинах $0.1 \div 0.2$ мкм, но признаки прорастания новой фазы видны и в отсекаемом слое, и в подложке до ~ 0.6 мкм. Предварительное введение центров преципитации позволило имплантировать основную дозу N^+ при $T_i = 1000^\circ C$, когда азот в Si весьма подвижен. Размытия захороненного слоя не произошло, он стал уже, но максимум плотности сместился к $0.2 \div 0.3$ мкм. Важно отметить, что отсеченный кремний свободен не только от структурных нарушений, но и от выделений нитрида.

Более наглядно роль центров осаждения и конкуренции между ними была видна после предварительного облучения ионами Ag^+ , поскольку использование Ag^+ позволяет контролируемо вводить на заданную глубину x мелкие несовершенные дислокационные петли [7]. Петли являются стоками для подвижных точечных дефектов и атомов азота [6,7]. Без введения петель азот при $T_i = 1000^\circ C$ стекает на поверхность (рис. 2, кривая 1). Уже после предварительного внедрения минимальной дозы Ag^+ распределение азота изменялось коренным образом. Оно простиралось по всей исследуемой глубине со слабо выраженными пиками у поверхности и в области R_d^{Ag} и R_d^N . Увеличение дозы Ag^+ до $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ делало пики более резкими. Повышение дозы до $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ вновь существенно меняло характер преципитации азота. Доминирующим становилось осаждение вблизи R_d^{Ag} , причем ширина захороненного слоя была заметно уже гауссианы упругих потерь ионов Ag^+ (см. рис. 2). Дальнейшее увеличение дозы Ag^+ приводило к асимметричному расширению слоя вглубь. Наконец, после дозы ионов Ag^+ $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ произошло третье существенное изменение профиля распределения азота. Он стал близок к распределению ионов N^+ по пробегам и без заметных особенностей вблизи R_d^N , R_d^{Ag} и поверхности.

Очевидными местами предпочтительного выделения новой фазы являются области максимального пересыщения примесью (R_d^N) и максимальных упругих потерь (R_d^{Ag} и R_d^N), поскольку структурные нарушения служат центрами зародышеобразования. Если центры вводились заранее самими же ионами N^+ , то область R_d^N оказывалась единственным местом предпочтительной преципитации (рис. 1). Высокие T_i эффективно подавляют дефектообразование при внедрении легких ионов [7], и способность к накоплению структурных нарушений сохраняется лишь вблизи R_d^N . Если же центры вводились предварительно ионами Ag^+ , то возникает конкуренция между областями R_d^{Ag} и R_d^N . После малых доз Ag^+ количество и размеры созданных ими дислокационных петель еще малы. Последующая имплантация ионов N^+ при $T_i = 1000^\circ C$ будет приводить к их диссоциации, минимальной в области R_d^{Ag} , где размеры петель изначально были наибольшими, и вблизи R_d^N , где имплантация N^+ создает максимальное пересыщение подвижными точечными дефектами. Это и предопределяет возникновение двугорбых профилей преципитации (рис. 2). Ограниченное число стоков

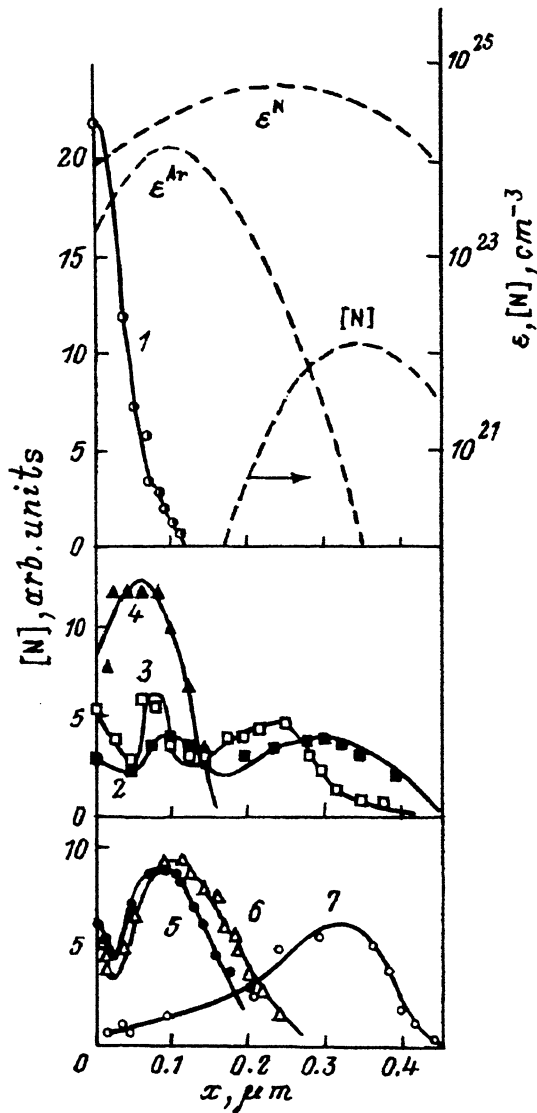


Рис. 2. Распределение имплантированного азота по глубине в образцах, предварительно облученных ионами Ar^+ дозами, см $^{-2}$: 1 — 0, 2 — $3 \cdot 10^{13}$, 3 — 10^{14} , 4 — $3 \cdot 10^{14}$, 5 — 10^{15} , 6 — $3 \cdot 10^{15}$, 7 — $1 \cdot 10^{16}$. Доза ионов азота — $2 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$. Штриховые линии — расчетные кривые распределения упругих потерь ϵ ионов Ar^+ и N^+ в единицах полной концентрации смещений и расчетный профиль распределения азота.

приводит также к росту размеров выделений, что является причиной размытия профилей. Увеличение высоты и резкости пиков с увеличением дозы Ar^+ связано с ростом количества стоков и соответствующим сокращением размеров выделений. После дозы $3 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$ стоки вблизи R_d^{Ar} становились доминирующими, что подавляло преципитацию в области R_d^N . Превышение указанной дозы сопровождалось накоплением

ем нарушений на крыльях гауссианы упругих потерь Ar^+ до уровня, обеспечивающего заметное осаждение на них диффундирующего от R_p^N азота. Наконец, после дозы Ar^+ $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ концентрация стоков вблизи R_p^N увеличивалась настолько, что преципитация азота происходила в непосредственной близости от места остановки ионов N^+ (рис. 2).

Помимо упомянутых выше трех мест предпочтительного выделения новой фазы необходимо упомянуть еще одно — граница между захороненным аморфизированным слоем и сохранившим кристалличность кремнием [1,2]. Из-за высокого содержания азота аморфизация захороненного слоя наступала в наших экспериментах даже при $T_i = 850^\circ\text{C}$. Мы полагаем, что образование нитрида при $T_i = 850^\circ\text{C}$ шло вначале на глубине R_d^N , а после достижения аморфизации — и около межфазной границы, располагавшейся ближе к поверхности. С этим связано общее смещение к поверхности захороненного слоя нитрида (рис. 1). Поясним, что при $T_i = 850^\circ\text{C}$ максимум распределения имплантированного азота не смещается с $R_p^N = 0.32 \text{ мкм}$ и темный контраст на рис. 1 характеризует только выделение фазы нитрида.

Работа выполнена частично при поддержке грантом Фонда Сороса, присужденного Американским физическим обществом.

Список литературы

- [1] L. Nesbit, S. Stiffler, G. Slusser, H. Vinton. *Electrochem. Soc.*, **132**, 2713 (1985).
- [2] C.G. Tuppen, M.R. Taylor, P.L.F. Hemment, R.P. Arrowsmith. *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 57 (1984).
- [3] G.F. Gerofolini, S. Bertoni, P. Fumagalli, L. Meda, C. Spaggiari. *Phys. Rev. B*, **47**, 10174 (1993).
- [4] S. Reiss, K.-H. Heinig. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **84**, 229 (1994).
- [5] S. Reiss, R. Weber, K.-H. Heinig, W. Skorupa. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **89**, 337 (1994).
- [6] G.A. Kachurin, I.E. Tyschenko, V.P. Popov, S.A. Tijs. *Phys. St. Sol. (a)*, **113**, K165 (1989).
- [7] G.A. Kachurin, I.E. Tyschenko, L.I. Fedina. *Nucl. Instrum. Meth. B*, **68**, 323 (1992).

Редактор Л.В. Шаронова

Effect of competing precipitation sites on distribution of nitrogen that is being implanted in silicon under buried layers formation

G.A. Kachurin, I.E. Tyschenko, S.A. Tijs, A.E. Plotnikov

Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 630090 Novosibirsk, Russia

Precipitation of nitrogen during its implantation into Si at 1000°C was enhanced by a preradiation with N^+ and Ar^+ ions at lower temperatures. Significant changes in the nitrogen distribution were found to be function of preirradiation conditions. The results obtained are explained in terms of the impurity atom and point defect sinks.