

УДК 621.315.592

©1995 г.

ВЛИЯНИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ДИФФУЗИЮ ЗОЛОТА В КРЕМНИИ

И.В. Антонова, С.С. Шаймеев

Институт физики полупроводников
Сибирского отделения Российской академии наук,
630090, Новосибирск, Россия
(Получена 24 февраля 1994 г. Принята к печати 20 июля 1994 г.)

Проведено исследование диффузии атомов золота из пленки, нанесенной на поверхность кремниевой пластины, при облучении потоком ионов обратной стороны полупроводниковой пластины. Показано, что воздействие ионами (Ne^+ , 100 кэВ) способствует вытеснению атомов золота из регулярного положения и препятствует диффузии Au из приповерхностной области в объем образца. Аналогичный эффект получен при возбуждении акустической волны в кристалле. Предполагается, что наблюдаемый при облучении эффект связан с упругими волнами, возникающими при торможении ионов.

Известно, что ионная имплантация способна оказывать влияние на различные физические процессы, протекающие на значительных расстояниях (по сравнению с длиной пробега иона) от области торможения [1-3], и, в частности, на диффузию примесных атомов в кремнии (см., например, [4]). Для объяснения такого влияния обычно привлекают миграцию точечных дефектов (собственных вакансий и/или межузельных атомов) или взаимодействие упругих волн, возникающих при торможении ионов, со структурными нарушениями [3]. Однако экспериментальные результаты, приводимые в работах, не позволяют однозначно высказаться в пользу того или ионного механизма.

В данной работе проведено исследование диффузии атомов золота из пленки, нанесенной на поверхность кремниевой пластины, при воздействии потока ионов с обратной стороны кристалла и обсуждаются возможные физические причины воздействия имплантации ионов на процесс диффузии. Золото было выбрано в качестве объекта наблюдения по причине его высокой подвижности в кремнии и надежной идентификации методом DLTS.

В качестве исходного материала использовались пластины кремния типа КЭФ-1, толщиной $h = 260$ мкм, диаметром $d = 30$ мм, на лицевую сторону которых напылялась пленка золота. Облучение проводилось

с обратной стороны пластины ионами Ne^+ с энергией 100 кэВ, в интервале доз $10^{14} \div 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Время набора дозы составляло 30 мин при температуре образца 600 °С. Остатки золота снимались с поверхности пластины в царской водке. Концентрация атомов золота в электрически активном состоянии (замещающее положение атома золота Au_s [5]) измерялась методом DLTS на барьерах Шоттки по уровню $E_c - 0.54 \text{ эВ}$. Распределение электрически активных центров в приповерхностном слое контролировалось также по вольт-амперным и вольт-фарадным характеристикам [6]. Наличие в объеме кристалла атомов золота в электрически неактивном состоянии фиксировалось после их активации кратковременным высокотемпературным отжигом (1000 °С, 1 мин). Для снятия профиля распределения концентрации Au_s применялось послойное стравливание образцов в травителе $\text{HF}:\text{HNO}_3$ в пропорции 1:100. Величина снятого слоя контролировалась по высоте ступеньки, создаваемой защитным покрытием на части кристалла.

С целью разделения возможного влияния радиационных дефектов и акустических волн на процесс диффузии золота часть пластины во время облучения закрывалась экраном от непосредственного воздействия ионного пучка (рис. 1). Для проведения измерений из пластины вырезались образцы, которые подразделялись на три группы — группу a составили образцы, вырезанные из облученной части, b — из закрытой экраном части образца и c — из кристаллов, находившихся в ионной камере во время облучения, но полностью закрытых экраном.

Известно, что при травлении кремния, содержащего золото, часть примеси адсорбируется на поверхности пластины из раствора [7]. При активационном отжиге Au может проникать в объем кристалла и, следовательно, вносить ошибку в значения измеряемых концентраций. Поэтому были проведены контрольные эксперименты: с исходной пластины снималась пленка золота, затем стравливались слои различной толщины и проводился активационный отжиг. В результате было получено, что как в травленых образцах, так и в образцах без травления электрически активных центров, связанных с золотом, после активационного отжига не наблюдается. Это может быть следствием малых концентраций золота на поверхности и в приповерхностной области кристалла.

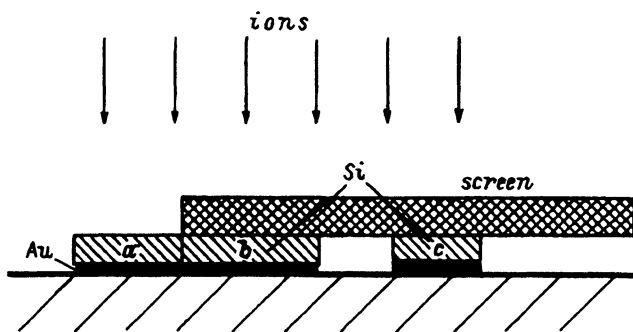


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по облучению: a — облученная и b — необлученная области пластины кремния, c — пластина кремния, полностью закрытая экраном; Au — пленка золота на поверхности пластины кремния.

1. В образцах группы *c* распределение атомов электрически активного золота Au_5 по глубине соответствует обычному диффузионному профилю [8], получаемому в случае диффузии атомов золота из неограниченного источника, расположенного на поверхности кристалла, и достаточно хорошо описывается зависимостью $N(x) = N_0 \operatorname{erfc}[x/2\sqrt{Dt}]$ (кривая 1 на рис. 2 — расчет при $N_0 = 9.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $D = 2 \times 10^{-11} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$). В кристаллах, обратная сторона которых подвергалась облучению ионами, золота в электрически активном состоянии обнаружено не было как в образцах группы *a*, так и в образцах группы *b*, что связано с одной из двух возможных причин: либо золото перешло в этих образцах в электрически неактивное состояние, либо оно не проникло в объем кристалла. Для выявления возможного присутствия атомов золота в электрически неактивном состоянии проводилась активация примеси высокотемпературным кратковременным отжигом. Измерения показали, что после активации действительно в образце наблюдается уровень $E_c - 0.54 \text{ эВ}$, связанный с электрически активным состоянием атомов золота в обеих (*a* и *b*) частях пластины. Однако при таких термообработках неизбежно происходит перераспределение примесных атомов (характерная длина диффузии при используемом режиме активации $\sim 1 \text{ мкм}$). С целью уменьшения этого эффекта послойное травление образцов проводилось до активации. На рис. 2 пунктиром приведены профили, полученные после активации золота в образцах группы *a* для минимальной (кривая 3) и максимальной (кривая 4) доз облучения. Так как высокотемпературная активация приводит к перераспределению примеси, послойные измерения концентраций золота позволили сделать только верхние оценки коэффициента диффузии. Установлено, что с ростом дозы облучения коэффициент диффузии падает для обеих групп образцов. Так, в частности, для дозы 10^{14} см^{-2} верхняя оценка коэффициента диффузии золота составляет $8 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, а для максимальной дозы $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} - 1 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Параметр N_0 для образцов группы *a* близок к значению N_0 в кристаллах группы *c*, а для группы *b* примерно в два раза меньше. На поверхности образцов группы *b* образовался твердый раствор золота с кремнием, так же как и на поверхности образцов группы *c*.

2. В приповерхностной области кристалла, подвергнутого непосредственному воздействию ионного пучка, присутствуют электрически активные центры радиационного происхождения в концентрации $\sim 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В то время как в других местах и, в частности, на противоположной стороне кристаллов *a* радиационных дефектов в заметных концентрациях не обнаружено. Таким образом, характерные длины диффузии радиационных дефектов не превосходят величину $L_D = h / \ln(N_1/N_2) \lesssim 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}$, где $N_1 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ — концентрация радиационных дефектов в приповерхностной области, подвергнутой непосредственному облучению; $N_2 = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ — предел чувствительности установки DLTS, $h = 2.6 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ — толщина образцов. Следовательно, если за эффект в кристаллах группы *b* ответственны радиационные дефекты, тогда должна наблюдаться сильная зависимость эффекта от расстояния до границы, разделяющей образцы типов *a* и *b*.

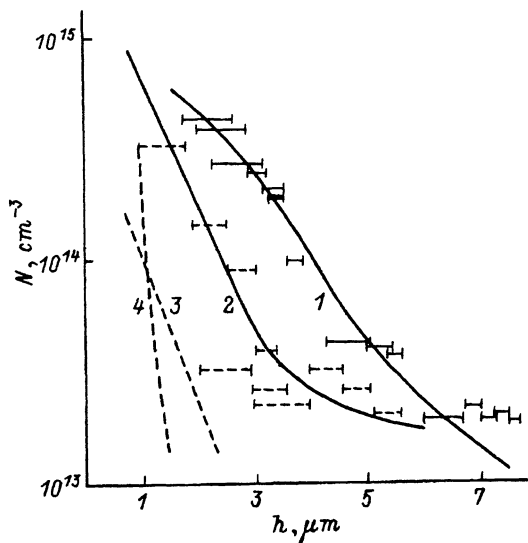


Рис. 2. Распределение концентрации атомов золота после диффузии при 600°C 30 мин. 1 — образец группы с, экспериментальные результаты (точки) и расчет для диффузии из неограниченного источника (сплошная линия); 2 — тот же образец после пропускания акустической волны (250 кГц, 30 мин); 3, 4 — профили золота в образце группы а после активационного отжига для минимальной и максимальной доз облучения соответственно.

Однако описанные выше эффекты однородны (в пределах точности эксперимента) по поверхности для каждой части кристалла, причем переходная область между частями a и b меньше 1 мм (диаметр барьера Шоттки).

Если допустить, что диффузионная длина радиационных дефектов значительно больше $L_D \sim 2 \cdot 10^{-3}$ см, но при этом электрически активные радиационные центры по какой-либо причине не вводятся, то глубина проникновения радиационных дефектов, возникающих под действием ионного пучка, из области a в области b не будет превосходить толщину h , так как поверхность кристалла является стоком для них [9]. В то же время коэффициент затухания упругих волн в кремнии для частот $\sim 10^5$ Гц не превышает 2 дБ/см [10], т.е. упругие волны на расстояниях порядка диаметра пластины затухают менее чем в 1.8 раз.

Полученные результаты не могут быть объяснены миграцией точечных дефектов на значительные расстояния по следующим причинам. Во-первых, центры радиационного происхождения обнаружены только вблизи поверхности, непосредственно подвергавшейся воздействию ионного пучка. Во-вторых, радиационные дефекты, если они и обладают большой диффузионной длиной, не могут существенно повлиять на процесс диффузии Au в области кристалла, защищенного экраном, так как глубина проникновения в ту область будет составлять величину порядка толщины пластины (~ 0.26 мм), и должна наблюдаться зависимость эффекта от расстояния до границы облученная-необлученная область, в то время как экспериментально наблюдается однородность свойств по всей закрытой области длиной ~ 15 мм.

Для проверки возможного влияния ионной имплантации на диффузию золота через акустические волны (известно, что акустические волны способны оказать воздействие на точечные дефекты в кремнии [11]), возбуждаемые при торможении ионов, были проведены эксперименты по воздействию акустической волны на процесс диффузии Au в кремнии.

Для возбуждения акустической волны пластина кремния приклеивалась к кристаллу ниобата лития, на который подавалось переменное напряжение. Время воздействия акустической волной составляло 30 мин при комнатной температуре. Напряжение, прикладываемое к пьезоэлектрику, составляло 10 В, величина тока 10^{-4} А, частота возбуждаемой волны 250 кГц. Исследования проводились на образцах из группы с (они приклеивались к пьезоэлектрику обратной стороной). В результате DLTS-измерений установлено, что профиль электрически активных атомов золота поджимается к поверхности (рис. 2, кривая 2), а анализ вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик показал увеличение концентрации атомов Au примерно на порядок в приповерхностной области, не доступной для DLTS-измерений. Следовательно, при воздействии акустической волной происходит оттеснение золота к поверхности. Проведение высокотемпературного активационного отжига приводит, как отмечалось выше, к перераспределению атомов золота на расстояниях ~ 1 мкм, что не позволило получить дополнительное подтверждение обнаруженного эффекта на этих образцах. Конечно, прямое сравнение результатов при ионной имплантации и действии акустической волны пока не правомерно (разные температурные режимы, отсутствие сравнений абсолютных величин энергий акустических волн в этих двух случаях, их различие по частотным характеристикам и др.), но налицо качественное подобие эффектов.

Таким образом, на основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы.

Воздействие ионным пучком способствует вытеснению атомов Au из регулярного положения и препятствует диффузии Au с поверхности пластины в объем образца. Качественно аналогичный эффект получен при воздействии акустической волной на кристалл. Следовательно, можно предполагать, что часть энергии, выделяемой в области торжования ионного пучка, затрачивается на возбуждение акустической волны, переносится на расстояния, существенно большие, чем размеры области упругих потерь, и оказывает влияние на процесс диффузии.

Авторы благодарны С.И. Романову и В.А. Патренину за помощь в проведении облучений и Л.С. Смирнову за полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] В.Д. Скупов, Д.И. Тетельбаум, Г.В. Шенгуров. Письма ЖТФ, **22**, 44 (1989).
- [2] Н.Т. Квасов, К.Ю. Ярацюнас, С.Ф. Спизжук, С.Ю. Шилина. Физика и химия обраб. материалов, **5**, 9 (1990).
- [3] П.В. Павлов, В.Д. Скупов, Д.И. Тетельбаум. Физика и химия обраб. материалов, **6**, 19 (1987).
- [4] В.П. Грабчак, Л.И. Сальников, Е.И. Филиппов. Электрон. техн., сер. 3, Микроэлектроника, **3**, 56 (1968).
- [5] Н.Т. Баграев, В.С. Вихнин. ЖЭТФ, **86**, 200 (1984).
- [6] S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices* (N.Y., 1981).
- [7] Р.Ш. Малкович, В.А. Машина, Н.П. Нистерюк. ФТТ, **14**, 3678 (1977).
- [8] *Атомная диффузия в полупроводниках*, под ред. Д.Шоу (М., 1975).
- [9] J. Vanhellemont, A. Roano-Rodriuez. Appl. Phys. A, **57**, 521 (1993).
- [10] Дж. Такер, В. Ремптон. *Гиперзвук в физике твердого тела* (М., 1975).
- [11] И.В. Островский, О.А. Коротченков, В.А. Лысых. ФТТ, **29**, 2153 (1987).

The influence of ion bombardment on the gold diffusion in silicon

I.V. Antonova, S.S. Shaimeev

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