

конкурирующих нейтральных лигандов могут привести к сдвигу равновесия и образованию иных комплексов уранила.

1. Комплексные соединения урана / Отв. ред. И.И. Черняев. М., 1964.
2. Фомин В.В. Химия экстракционных процессов. М., 1960.
3. Ягодин Г.А., Сергиевский В.В., Евдокимова Л.В., Бабенко Л.И. // Докл. АН СССР. 1981. Т.28. №3. С.695.
4. Химия урана / Отв. ред. Б.Н.Ласкорин. М., 1989.
5. Зажогин А.П., Серафимович А.И., Комяк А.И. // Журн. прикл. спектр. 1994. Т.60. №1-2. С.94.
6. Шевченко В.Б., Судариков Б.Н. Технология урана. М., 1961.

Поступила в редакцию 09.11.98.

УДК 521.315.592

Л.А.КАЗАКЕВИЧ, П.Ф.ЛУТАКОВ

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, СОЗДАВАЕМЫХ АТОМАМИ МАГНИЯ, НА ОБРАЗОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРЕМНИИ

The effect of impurity magnesium on the accumulation processes of compensating radiation defects in epitaxial Si layers was studied. Increase of the *A*- and *E*-centres production rates during additional doping of epitaxial layers by magnesium was discovered. The results obtained are explained taking into account compensation by magnesium atoms of the surface-induced elastic stress fields.

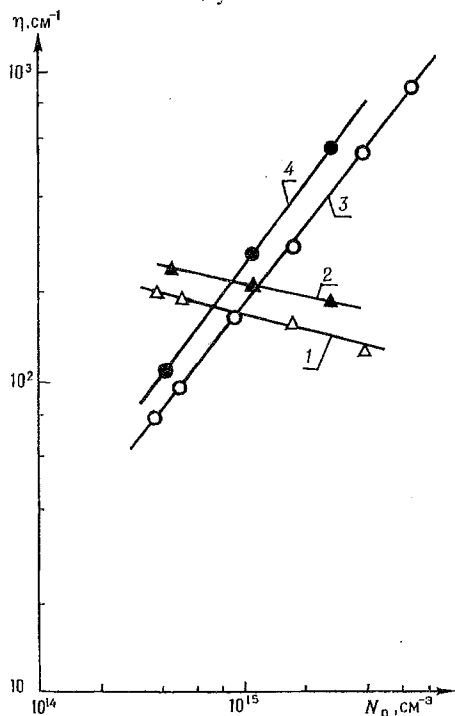
Дополнительное легирование кремния примесями обычно приводит к изменению процессов дефектообразования при облучении частицами высоких энергий, потому что примесные атомы эффективно взаимодействуют с первичными радиационными дефектами (РД), образуя различного рода комплексы [1,2]. Кроме того, из-за различия атомных радиусов кремния и легирующих элементов в кристаллической решетке могут возникать упругие (деформационные) напряжения, что может оказать существенное влияние на пространственное перераспределение, кинетику миграции и взаимодействия компонент пар Френкеля [3,4]. В данной работе изучалось влияние примеси магния на образование в кремнии компенсирующих РД.

Эксперименты выполнялись на легированных фосфором слоях *n*-кремния ( $\rho = 1 \div 20$  Ом·см), полученных методом эпитаксии из газовой фазы на инверсных подложках. В процессе выращивания эпитаксиальные слои дополнительно легировались магнием. Магний, являясь элементом второй группы таблицы Менделеева, создает в запрещенной зоне кремния два донорных энергетических уровня  $E_c - 0,25$  эВ и  $E_c - 0,11$  эВ [5]. По их концентрации и определялось содержание магния в исследуемых материалах, которое находилось в пределах  $N_{Mg} = (4 \div 8) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. В качестве контрольных использовались эпитаксиальные слои кремния, выращенные в идентичных условиях, но без легирования магнием. Облучение осуществлялось ( $T_{обл.} \leq 50^\circ\text{C}$ )  $\alpha$ -частицами от изотопного источника <sup>210</sup>Po или  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Co. Для экспериментов подбирались слои толщиной  $d = 8 \div 10$  мкм, которая не превышала длину пробега бомбардирующих  $\alpha$ -частиц. На различных этапах облучения выполнялись холловские измерения (метод Ван-дер-Пау) температурных зависимостей концентрации носителей заряда в интервале  $T_{изм.} = 80 \div 400$  К.

Из анализа полученных результатов был определен энергетический спектр уровней компенсирующих РД, который оказался одинаковым в исследуемых и контрольных слоях. Наиболее эффективно при обоих видах облучения образуются дефекты, вносящие в запрещенную зону энергетические уровни  $E_c - 0,18$  эВ и  $> E_c - 0,30$  эВ. Эксперименты по отжигу РД с этими уровнями позволили связать их с *A*- и *E*-центрами соответственно [1-3]. При этом концентрации *N* образующихся *A*- и *E*-центров практически линейно растут при увеличении интегрального потока  $\Phi$   $\alpha$ -частиц и  $\gamma$ -квантов, что дает возможность рассчитать скорости  $\eta$  образования РД в исследуемых и контрольных слоях, так как  $\eta = N/\Phi$ . На рисунке приведены

зависимости  $\eta$   $A$ - и  $E$ -центров от содержания фосфора (концентрации  $N_p$ ) в нелегированных (кривые 1 и 3) и дополнительно легированных (кривые 2 и 4) магнием эпитаксиальных слоях, облученных  $\alpha$ -частицами (аналогичный вид имеют зависимости  $\eta_A$  и  $\eta_E$  от  $N_p$  при  $\gamma$ -облучении). Как видно, имеет место сильная зависимость  $\eta_E$  от  $N_p$ , а при наличии в эпитаксиальных слоях примеси магния наблюдаются более высокие скорости образования  $E$ -центров. Что касается  $A$ -центров, то эффективность их введения несколько уменьшается при увеличении  $N_p$ , но в исследуемых эпитаксиальных слоях остается выше, чем в контрольных.

Отметим следующие обстоятельства.



Зависимости скоростей образования  $A$ - (кривая 1,2) и  $E$ -центров (3,4) от содержания фосфора в эпитаксиальных слоях кремния:

$$N_M, \text{см}^{-2}: 1, 3 - 0; 2, 4 - (2+4) \cdot 10^{15}$$

3. Атомы магния не оказывают влияния на вероятность взаимодействия вакансий с атомами кислорода и фосфора, так как концентрация последних существенно выше, а образованию у магния атмосферы фоновых и (или) легирующих примесей препятствуют локальные поля упругих напряжений.

4. Атомы магния могут несколько компенсировать поля упругих напряжений поверхности эпитаксиальных слоев, так как создают противоположную по знаку деформацию кристаллической решетки, в результате чего уменьшается вероятность взаимодействия вакансий с поверхностью. Поэтому оказывается меньшим поток вакансий к поверхности, что приводит к увеличению скоростей образования вакансионных комплексов в объеме. При этом взаимодействие вакансий с поверхностью может быть интерпретировано как образование при облучении комплексов типа вакансия — атом поверхности. Дополнительное легирование эпитаксиальных слоев магнием уменьшает вероятность взаимодействия вакансий с атомами поверхности, а тем самым и скорость образования комплексов вакансия — атом поверхности.

Так как атомы магния лишь перераспределяют потоки первичных РД и не создают дополнительных стоков для них, то суммарная скорость образования вакансионных комплексов не изменяется при легировании эпитаксиальных слоев магнием и должно выполняться соотношение:

1. Атомы электрически активного магния располагаются в узлах кристаллической решетки и создают деформацию сжатия, так как их ковалентный радиус  $r$  больше, чем у атомов кремния ( $r_{Mg} = 1,38 \text{ \AA}$ ,  $r_{Si} = 1,17 \text{ \AA}$ ). В силу этого они не могут считаться стоками для собственных междоузельных атомов, но могли бы быть стоками для генерируемых облучением вакансий и приводить к уменьшению эффективности образования вакансионных комплексов, чего в действительности не наблюдается на опыте. Поэтому атомы магния не являются эффективными стоками, обуславливающими изменения скоростей образования РД.

2. Наблюдаемое на опыте в исследуемых материалах увеличение скоростей образования  $E$ - и  $A$ -центров может быть связано с влиянием атомов магния на перераспределение участвующих в комплексообразовании вакансий между различными стоками, в качестве которых в исследуемых эпитаксиальных слоях кремния выступают атомы кислорода, фосфора [1–3] и поверхность [3,6].

$$\eta_{VP} + \eta_{VO} + \eta_{VS} = \eta_{VP}^0 + \eta_{VO}^0 + \eta_{VS}^0, \quad (1)$$

где  $\eta_{VP}$ ,  $\eta_{VO}^0$  — скорости образования  $E$ -центров;  $\eta_{VO}$ ,  $\eta_{VO}^0$  —  $A$ -центров;  $\eta_{VS}$ ,  $\eta_{VS}^0$  — комплексов вакансия — атом поверхности в исследуемых и контрольных слоях соответственно. Система уравнений, описывающих накопление дефектов при облучении дополнительно легированных магнием эпитаксиальных слоев, имеет вид:

$$\eta_{VP} = 1/J \kappa_{VP} N_V N_P, \quad (2)$$

$$\eta_{VO} = 1/J \kappa_{VO} N_V N_O, \quad (3)$$

$$\eta_{VS} = 1/J \kappa_{VS} N_V^m N_S^n, \quad (4)$$

где  $\kappa_{VP}$ ,  $\kappa_{VO}$ ,  $\kappa_{VS}$  — вероятности взаимодействия вакансий с атомами фосфора, кислорода и элементами поверхности (или вероятности образования  $E$ -,  $A$ -центров и комплексов вакансия — атом поверхности);  $N_V$ ,  $N_P$ ,  $N_O$  — концентрации вакансий, атомов фосфора и кислорода;  $N_S = (1/a)^2$  — концентрация атомов поверхности;  $a$  — постоянная решетки;  $J$  — плотность потока бомбардирующих частиц;  $m$ ,  $n$  — целочисленные показатели степени.

Скорости образования  $E$ - и  $A$ -центров определяются экспериментально, поэтому уравнения (2)–(4) представляют собой систему линейных уравнений. Из (2)–(4) с учетом (1) может быть получено выражение для суммарной скорости образования  $E$ - и  $A$ -центров. При  $m=1$  и  $n=1$ , т.е. в случае взаимодействия одной вакансии с одним атомом поверхности, оно имеет вид:

$$\eta_{VP} + \eta_{VO} = \frac{\eta_{VP}^0 + \eta_{VO}^0}{1 - \frac{\Delta \kappa_{V,S} / \kappa_{V,O} N_S}{\kappa^* N_P + N_O}}. \quad (5)$$

Здесь  $\Delta \kappa_{V,S} = \kappa_{V,S}^0 - \kappa_{V,S}$  — разность между вероятностями взаимодействия вакансий с атомами поверхности в контрольных и легированных магнием эпитаксиальных слоях;  $\Delta \kappa_{V,S} / \kappa_{V,O}$  — относительное изменение вероятности взаимодействия вакансий с атомами поверхности при легировании эпитаксиальных слоев магнием;  $\kappa^* = \kappa_{VP} / \kappa_{VO}$  — отношение вероятностей взаимодействия вакансий с атомами фосфора и кислорода. Взаимодействие двух и более вакансий с одним атомом поверхности ( $m \geq 2$ ,  $n=1$ ) или одной вакансии с двумя и более атомами поверхности ( $m=1$ ,  $n \geq 2$ ) — процессы менее вероятные и поэтому их можно не рассматривать.

Выражение (5) достаточно хорошо описывает экспериментально получаемые зависимости по влиянию магния на накопление компенсирующих РД в кремниевых эпитаксиальных слоях. Согласно результатов расчета, выполненного с использованием известного [7] значения  $\kappa^* = \kappa_{VP} / \kappa_{VO} = 180$ , с экспериментальными данными достигается при  $\Delta \kappa_{V,S} / \kappa_{V,O} = (\kappa_{V,S}^0 - \kappa_{V,S}) / \kappa_{V,O} \approx 300$ . Этот результат означает, что дополнительное легирование эпитаксиальных слоев кремния магнием весьма существенно (более чем на два порядка) уменьшает вероятность взаимодействия вакансий с поверхностью из-за компенсации атомами магния поверхностных деформационных напряжений.

Таким образом, наблюдаемые на опыте в исследуемых эпитаксиальных слоях кремния более высокие, чем в контрольных, скорости образования компенсирующих РД объясняются в рамках диффузионного механизма дефектообразования с учетом влияния магния на перераспределение вакансий между различными стоками (атомы кислорода, фосфора, поверхность слоев). Определяющую роль при этом играет компенсация атомами магния полей упругих напряжений, создаваемых поверхностью эпитаксиальных слоев.

1. Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981.
2. Физические процессы в облученных полупроводниках / Под ред. Л. С. Смирнова. Новосибирск, 1977.
3. Вавилов В. С., Киселев В. Ф., Мукашев Б. Н. Дефекты в кремнии и на его поверхности. М., 1990.
4. Герасименко Н. Н., Мордкович В. Н. // Поверхность. Физ., хим., мех. 1987. №6. С.5.
5. Ho L. T., Ramdas A. K. // Phys. Rev. B. 1972. V.5. №2. P.462.
6. Кузнецов В. И., Лугаков П. Ф., Цикунов А. В. // ФТП. 1984. Т.18. №6. С.1007.
7. Винецкий В. Л., Ерицын Г. Н., Конозенко И. Д., Старчик М. И. // ФТП. Т.2. №9. С.1236.

Поступила в редакцию 09.06.98.

УДК 621.315.592:546.26

Н. Н. НИКИФОРЕНКО, А. А. ЛАБУДА, И. П. ТКАЧЕВ, В. Л. БОНДАРЕНКО

## ВЫРАЩИВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ АЛМАЗНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

The high-frequency vacuum-plasma plant for synthesis of diamond polycrystalline films from methanol vapors was created. It is distinguished for low energy consumption and material expenditure. The growth technology of diamond polycrystalline films 200–300 nm in thickness exhibiting good thermal sensitivity was worked out.

Поликристаллические алмазные пленки как новый материал с уникальными свойствами в последние годы являются предметом повышенного интереса среди разработчиков приборов (датчиков) в области электроники и микроэлектроники [1,2]. Этим оправдано совершенствование технологических способов осаждения пленок указанного типа, среди которых наибольший интерес представляют методы осаждения из газовой фазы при стимуляции высокочастотным газовым разрядом пониженного давления (*RF-PCVD*).

Целью данной работы является создание высокочастотной вакуумно-плазменной установки для синтеза алмазных поликристаллических и алмазоподобных углеродных пленок и разработка технологического процесса выращивания термочувствительных пленок в качестве исходного материала для датчиков температуры.

В созданной установке используется высокочастотный генератор относительно небольшой мощности (потребляемая электрическая мощность не более 1 кВт) с рабочей частотой 13,56 МГц. Откачка реактора (реакционно-разрядной камеры) осуществляется механическим форвакуумным насосом типа 2НВР-5ДМ через последовательно включенное дросселирующее устройство с электромагнитным приводом, что позволяет включать и выключать дросселирующее сопло в вакуумпроводе. В состав установки входят также следующие основные системы, приборы и узлы: система газонапуска (на 2 газа), вакуумметр термометрический, источник питания нагревателя (до 24В и 24А).

Важнейшей частью установки является плазменный реактор (рис.1), так как его конструкция во многом определяет кинетические условия синтеза (выращивания) пленок. Габаритные размеры разработанного реактора (без выступающих частей): диаметр 150 мм, высота 250 мм. Конструктивно реактор состоит из верхнего и нижнего электродов, кварцевого цилиндра, локализатора разряда и нагревателя. Верхний электрод (потенциальный, высокочастотный) имеет две части. Наружная часть электрода 1 выполнена из стали. Для ее эффективного охлаждения воздушным потоком вентилятора на поверхности имеются ребра. Внутренняя часть электрода 2 представляет собой полый стакан из нержавеющей стали. В верхней части стакана имеются отверстия для формирования потока плазмообразующего газа. Стакан соединен с наружной частью электрода винтами через керамические прокладки-упоры. Нижний (заземленный) электрод 3 – полый. Ко дну электрода приварены патрубки тоководов нагревателя и патрубков для подключения вакуумной системы. У концов патрубков имеются фланцы для подсоединения холодильь-