

# НАКОПЛЕНИЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ВАКАНСИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ МАГНИЕМ

П. Ф. Лугаков<sup>1)</sup>, Л. А. Казакевич<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> НИИ прикладных физических проблем им. А. Н. Свеченко, 220106, Республика Беларусь, Минск, Курчатова 7, т. 277-41-44

<sup>2)</sup> Белорусский государственный аграрный технический университет, 220608, Республика Беларусь, Минск, Скорины 99, т. 264-62-41

Изучено влияние примеси магния на процессы накопления компенсирующих радиационных дефектов в эпитаксиальных слоях кремния. Эксперименты выполнялись на легированных фосфором слоях *n*-кремния ( $\rho = 1 \div 20$  Ом.см), полученных методом эпитаксии из газовой фазы на инверсных подложках. Установлено, что: при наличии в эпитаксиальных слоях примеси магния наблюдаются более высокие скорости образования *E*- и *A*-центров несколько уменьшается при увеличении концентрации фосфора, но в исследуемых эпитаксиальных слоях остается выше, чем в контрольных. Объяснение полученным результатам дано с учетом компенсации атомами магния деформационных напряжений, создаваемых поверхностью.

## I. Введение

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.

## II. Методика эксперимента

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  $N_{Mg} = (4 \div 8) \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. В качестве контрольных использовались эпитаксиальные слои кремния, выращенные в идентичных условиях, но без легирования магнием. Облучение осуществлялось ( $T_{обл} \leq 50$  °С)  $\alpha$ -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.

## III. Экспериментальные результаты и их обсуждение

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, т.к.  $\eta = N/\Phi$ . Как следует из анализа зависимостей  $\eta$  *A*- и *E*-центров от содержания фосфора (концентрации  $N_P$ ), 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.

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 ( $r_{Mg} = 1,38$  А°,  $r_{Si} = 1,17$  А°). 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 у

в комплексообразовании вакансий

This document has been edited with Infix PDF Editor free for non-commercial use.

To remove this notice, visit [www.iceni.com/unlock.htm](http://www.iceni.com/unlock.htm)

различными стоками, в качестве которых в исследуемых эпитаксиальных слоях кремния выступают атомы кислорода, фосфора [1-3] и поверхность [3,6].

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 изменится при легировании эпитаксиальных слоев магнием и должно выполняться соотношение:

$$\eta_{NP} + \eta_{NO} + \eta_{NS} = \eta_{NP}^0 + \eta_{NO}^0 + \eta_{NS}^0, \quad (1)$$

где  $\eta_{NP}$ ,  $\eta_{NP}^0$  - скорости образования E-центров;  $\eta_{NO}$ ,  $\eta_{NO}^0$  - A-центров;  $\eta_{NS}$ ,  $\eta_{NS}^0$  - комплексов вакансия-атом поверхности в исследуемых и контрольных слоях соответственно. Система уравнений, описывающих накопление дефектов при облучении дополнительно легированных магнием эпитаксиальных слоев, имеет вид:

$$\eta_{NP} = 1/J \cdot k_{V,P} N_V N_P, \quad (2)$$

$$\eta_{NO} = 1/J \cdot k_{V,O} N_V N_O, \quad (3)$$

$$\eta_{NS} = 1/J \cdot k_{V,S} N_V^m N_S^n, \quad (4)$$

где  $k_{V,P}$ ,  $k_{V,O}$ ,  $k_{V,S}$  - 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  $n = 1$ , то есть в случае взаимодействия одной вакансии с одним атомом поверхности оно имеет вид:

$$\eta_{NP} + \eta_{NO} = \frac{\eta_{NP}^0 + \eta_{NO}^0}{1 - \frac{\Delta k_{V,S} / k_{V,O} N_S}{k^* N_P + N_O}}. \quad (5)$$

Здесь  $\Delta k_{V,S} = k_{V,S}^0 - k_{V,S}$  - разность между вероятностями взаимодействия вакансий с атомами поверхности в контрольных и легированных магнием эпитаксиальных слоях;  $\Delta k_{V,S} / k_{V,O}$  - относительное изменение вероятности взаимодействия вакансий с атомами поверхности при легировании эпитаксиальных слоев магнием;  $k^* = k_{V,P} / k_{V,O}$  - 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 результатам расчета, выполненного с использованием известного [7] значения  $k^* = k_{V,P} / k_{V,O} = 180$ , с экспериментальными данными достигается при  $\Delta k_{V,S} / k_{V,O} = (k_{V,S}^0 - k_{V,S}) / k_{V,O} \approx 300$ . 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.

#### IV. Заключение

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.

#### Список литературы

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., Ерицян Г.Н., Конозенко И.Д., Старчик М.И. // ФТП. - Т. 2. - № 9. - С. 1236.



This document has been edited with Infix PDF Editor - free for non-commercial use.

To remove this notice, visit: [www.icni.com/unlock.htm](http://www.icni.com/unlock.htm)

## ACCUMULATION OF VACANCY COMPLEXES IN MAGNESIUM-DOPED SILICON UPON IRRADIATION

P.F.Lugakov<sup>1)</sup>, L.A.Kazakevich<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>A.N. Sevchenko Research Institute for Applied Physical Problems, 7 Kurchatov St., 220106 Minsk, Belarus, phone: 277-41-44

<sup>2)</sup>Belarusian State Agrarian Technical University, 99 Fr. Scoriny Pr., 220608 Minsk, Belarus, phone: 264-62-41

The effect of Mg impurity on the processes of accumulation of the compensating radiation defects (RD) in epitaxial layers of Silicon has been studied. The experiments have been performed with the phosphorus-doped layers of n-type Silicon ( $\rho = 1 \div 20 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$ ) produced by the gas-phase epitaxy at inverse substrates. In the process of growth the epitaxial layers were additionally doped with magnesium. The epitaxial Silicon layers grown in the identical conditions but without Mg-doping were used as the reference ones. Irradiation ( $T_{ir} \leq 50^\circ \text{C}$ ) was effected by  $\alpha$ -particles from the  $^{210}\text{Po}$  isotope source or by  $\gamma$ -quanta of  $^{60}\text{Co}$ . Hall measurements (van der Pauw method) of the temperature dependences for the carrier charge concentrations over the range  $T_{meas} = 80 \div 400 \text{ K}$  have been performed at different stages of irradiation. Based on analysis of the results obtained, the energy spectrum of compensating RD levels has been determined, and proved to be identical in the reference and examined samples. For both types of irradiation most effectively formed were the defects, contributing to the bandgap those energy levels ( $E_c - 0.18 \text{ eV}$  and  $>E_c - 0.30 \text{ eV}$ ) which are associated with A- and E-centers, respectively. It has been found that (1) rate of the E-center formation is strongly dependent on the phosphorus content; (2) higher rates of the E-center formation are observed in the epitaxial layers with Mg impurity present; (3) efficiency of the A-center introduction somewhat lowers with the increased concentration of phosphorus, being higher in the epitaxial layers under study as compared to the reference ones. The obtained results have been interpreted with due consideration for compensation of the surface-created deformation stresses by Mg atoms.

