

06

Двухстадийное легирование кремния изотопами фосфора и серы-32

© Ш. Махкамов, Н.А. Турсунов, М. Каримов,
А.Р. Саттиев, М. Ашуруп, М. Эрдонов, Х.М. Холмедов

Институт ядерной физики АН Республики Узбекистан, Ташкент
E-mail: makhkamov@inp.uz

Поступило в Редакцию 30 октября 2007 г.

Предложен принципиально новый подход к получению твердых источников примеси серы для диффузионного легирования кремния двухстадийным методом, позволивший устранить эрозию поверхности полупроводниковых пластин. Суть этого подхода заключается в превращении радионуклида ^{32}P , продиффундировавшего в приповерхностную область кремния после первой стадии диффузии (загонка), в изотоп ^{32}S .

Показано, что в образцах кремния, легированных изотопом ^{32}S , появляются глубокие уровни с энергиями ионизации $E_c-0.13$, $E_c-0.25$, $E_c-0.37$ и $E_c-0.50$ eV донорного характера, обусловленными примесью серы.

Установлено, что диффузия изотопа серы в *p*-Si приводит к изменению типа проводимости материала, а в *n*-Si снижает величину удельного сопротивления ρ .

PACS: 66.30.Jt, 71.55.Cn

Получение легированных полупроводниковых материалов и приборов на их основе, обладающих наперед заданными и стабильными свойствами, представляет большой интерес в современной твердотельной электронике.

В этом отношении особая роль принадлежит быстродиффундирующим глубоководным примесям, введения которых позволяют регулировать в широком пределе основные параметры материалов и улучшать их электрофизические, фотоэлектрические и другие свойства. К числу этих примесей относится сера. Кремний, легированный серой, подробно исследован в ряде работ [1–5]. Первые результаты по Si(S) получены Карлсоном [1]; и показано, что при введении серы в кремний образуются два донорных уровня $E_c-0.18$ и $E_c-0.37$ eV [1]. В других работах сообщается об образовании уровней: $E_c-0.135$ (0.19), $E_c-0.285$ (0.35), $E_c-0.277$ (0.325), $E_c-0.476$ (0.546) eV [2,3]; $E_c-0.13$,

$E_c - 0.257$, $E_c - 0.36$, $E_c - 0.5$ eV [4,5]. При этом предполагается, что уровни $E_c - 0.13$ и $E_c - 0.257$ eV обусловлены жестко связанными атомами S, расположенными в узле решетки Si. В [4] также показано, что эффективность образования уровней серы $E_c - 0.36$ и $E_c - 0.50$ eV зависит от скорости последидиффузионного охлаждения и наличия упругих деформаций и связана с различными зарядовыми состояниями комплекса междоузельный атом серы—вакансия.

Однако введение серы в кремний традиционным методом из паровой фазы неизбежно вызывает эрозию его поверхности. Это обстоятельство не позволяет провести диффузию серы в эпитаксиальный кремний для создания пленочных фоторезисторов. Используемые при этом другие методы, например диффузия из нанесенного на поверхность кремния растворенных атомов в толуоле [4,5], также малоэффективны, так как в этом случае не достигается высокая однородность легирования тонких слоев кремния, а степень легирования ограничивается содержанием серы в растворе.

В данной работе нами предложен принципиально новый подход к созданию источника примеси серы для диффузионного легирования кремния двухстадийным методом, позволивший устранить эрозию поверхности материала атомами серы и достичь высокой степени легирования.

Суть этого подхода заключается в превращении радионуклида ^{32}P , продиффундировавшего в приповерхностную область кремния после первой стадии диффузии (загонка), в изотоп ^{32}S по реакции путем β -распада



с последующей диффузией ^{32}S (разгонка) в объем кремния.

Для проведения исследований были отобраны образцы кремния n - и p -типа проводимости с концентрацией примеси фосфора и бора от $4 \cdot 10^{13}$ до $5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. В качестве диффузанта использован радионуклид ^{32}P , полученный по стандартной технологии путем облучения особо чистой серы нейтронами спектра деления на атомном реакторе ВВР-СМ с мощностью 10 MW в течение 400 h по реакции $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ [6].

Диффузия (загонка) радионуклида ^{32}P осуществлялась на воздухе из нанесенного на поверхность диффузанта при температурах $1100 \div 1250^\circ\text{C}$. Время диффузии варьировалось в пределах $5 \div 10$ h.

Одновременно при тех же температурах была проведена диффузия серы для контрольных образцов из полимерных источников.

Электрофизические параметры образцов до и после легирования измерялись на стандартной установке Холла. Энергетическое положение уровней определялось методом DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) в интервале температур $80 \div 400$ К в режиме постоянного напряжения при временном окне с $t_1 = 50 \mu\text{s}$ и $t_2 = 5t_1$, где t_1 и t_2 — интервал времени, при котором измеряется разность емкости $\Delta C = C(t_2) - C(t_1)$ [7]. Для емкостных измерений из легированного кремния изготавливались сплавные p - n -переходы путем плавления Au + 0.1 %Sb с одной стороны и Al с другой в вакууме 10^{-4} Торр при 700°C в течение 1–2 min.

На всех исследуемых образцах были сняты концентрационные кривые распределения радионуклида ^{32}P по глубине пластин. Концентрация определялась по результатам измерения удельной электропроводности последовательно снимаемых с образца слоев четырехзондовым методом

$$C\mu = \frac{1}{4.5} \frac{1}{\Delta l q} \left(\frac{I_1}{V_1} - \frac{I_2}{V_2} \right), \quad (2)$$

где C — концентрация носителей заряда; μ — их подвижность; q — заряд; Δl — толщина снимаемого слоя; I_1 и I_2 — значения тока, протекающего через образец до и после снятия слоя; V_1 и V_2 — значения напряжения на зондах до и после снятия слоя.

Проведенные измерения удельного сопротивления диффузионного слоя показали, что при этом радионуклид ^{32}P в зависимости от времени загонки на первой стадии диффузии проникает на $10 \div 20 \mu\text{m}$ (рис. 1, кривая 2). Распределение концентрации радионуклида ^{32}P в образованном при этом диффузионном слое можно рассматривать как диффузию из постоянного источника в полуограниченное тело, которое хорошо подчиняется закону (рис. 1, кривая 1)

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}, \quad (3)$$

где N_0 — поверхностная концентрация радионуклида ^{32}P или ^{32}S ; $N(x, t)$ — концентрация радионуклида ^{32}P или ^{32}S на глубине x после t h диффузионного отжига; D — коэффициент диффузии радионуклида ^{32}P или ^{32}S .

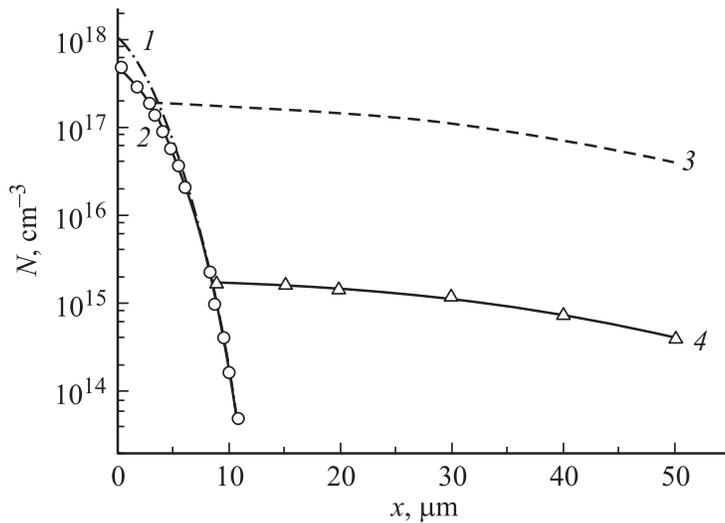


Рис. 1. Распределение концентрации радионуклида ^{32}P и ^{32}S по толщине кремния после диффузии при 1100°C в течение 5 h: 1, 2 — распределение радионуклида ^{32}P ; 3, 4 — распределение ^{32}S ; 1, 3 — расчетная; 2, 4 — экспериментальная.

Далее после выдержки нескольких периодов полураспада изотопа ^{32}P проводилась вторая стадия диффузии (разгонка) ^{32}S при тех же условиях. После удаления с поверхности фосфорсодержащего оксида электрическими и емкостными методами контролировались концентрации ^{32}S . Кривые распределения концентрации ^{32}S приведены на рис. 1. Расхождения расчетных значений концентрации ^{32}S (рис. 1, кривая 3) и измеренных величин (рис. 1, кривая 4) обусловлены тем, что измеренная концентрация примеси серы соответствует только ионизованным уровням серы в кремнии из ядерно-превращенного радионуклида ^{32}P .

На рис. 2 представлен спектр DLTS p - n -структур, изготовленных из кремния, легированного изотопом ^{32}S . Как видно из рисунка, на спектре DLTS появляются четыре пика, обусловленные глубокими уровнями с энергиями ионизации $E_c - 0.13$; $E_c - 0.25$; $E_c - 0.37$ и $E_c - 0.50$ eV донорного характера. Сопоставление значений этих уровней с литературными данными показали хорошее согласие.

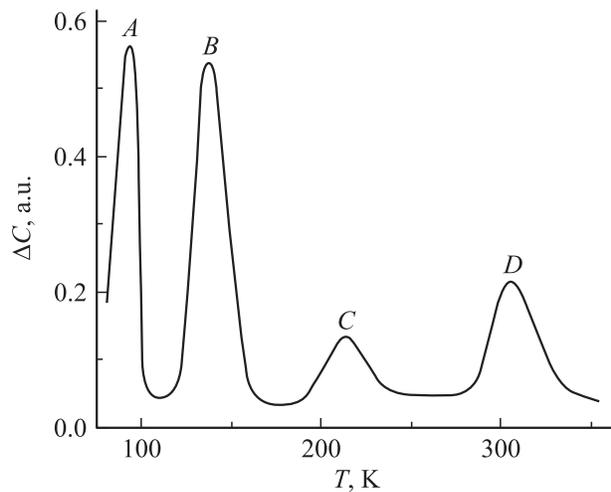


Рис. 2. Спектр DLTS $p^+ - n - n^+$ -структур, изготовленных из кремния, легированного примесью серы-32 при температуре 1100°C. A — $E_c - 0.13$ eV; B — $E_c - 0.25$ eV; C — $E_c - 0.37$ eV; D — $E_c - 0.50$ eV.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать заключение о том, что предложен новый радиационно-термический способ однородного легирования кремния изотопом серы из раствора радионуклида фосфор-32, исключающий эрозию его поверхности. Данный способ позволит провести диффузию серы и в эпитаксиальный кремний и может найти широкое применение в технологии изготовления пленочных фоторезисторов, работающих в инфракрасной области спектра излучения.

Список литературы

- [1] Carlson R.O., Hall R.N., Pell E.M. // J. Phys. Chem. Solids. 1959. V. 8. P. 81–86.
- [2] Кирюхин А.Д., Григорьев В.В., Зуев А.В., Зуев В.В., Королев Н.А. // ФТП. 2007. Т. 41. В. 3. С. 269–272.
- [3] Pensl G., Roos G., Holm C., Wagner P. Defects in Semiconductors / Ed. H.J. Bardeleben. Materials Science Forum. Switzerland, 1986. V. 10–12. P. 911–916.

- [4] Юнусов М.С., Каримов М., Оксенгендлер Л., Юсупов А. // ФТП. 1997. Т. 31. В. 6. С. 708–711.
- [5] Махкамов Ш., Турсунов Н.А., Хакимов З.М., Ашуров М., Эрдонов М., Саттиев А.Р. // Ядерная и радиационная физика. Материалы 4 Межд. конф. Алматы, Казахстан, 15–17 сентября 2003 г. ИЯФ НЯЦ РК, 2004. Т. II. С. 170–181.
- [6] Маслов И.А., Лукницкий В.А. Справочник по нейтронному активационному анализу. Л.: Наука, 1971. С. 37.
- [7] Берман Л.С., Лебедев А.А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. С. 43.