

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-СТИМУЛИРОВАННОЙ ДИФФУЗИИ ФОСФОРА В КРЕМНИИ

В.Т.Мак

Радиационно-стимулированные процессы (РСП) играют важную роль в модификации параметров элементов электронной техники при  $\gamma$ -облучении. Рядом исследователей указывалось на стимулированное радиацией изменение профиля распределения легирующей примеси в Si и анализировались возможные механизмы воздействия излучения на его форму. Подробный анализ этих работ проведен в [1]. Среди причин диффузии при малых дозах и мощностях доз  $\gamma$ -облучения следует выделить рекомбинационно-стимулированную диффузию точечных дефектов [2,3]. Исследованию параметров рекомбинационно-стимулированной диффузии фосфора в кремнии посвящена настоящая работа.

Изучая влияние гамма-облучения на усилительные свойства транзисторов, было обнаружено, помимо прочего, изменение профиля распределения электрически активной примеси вблизи эмиттерного перехода в базе  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторной структуры (см. рисунок).

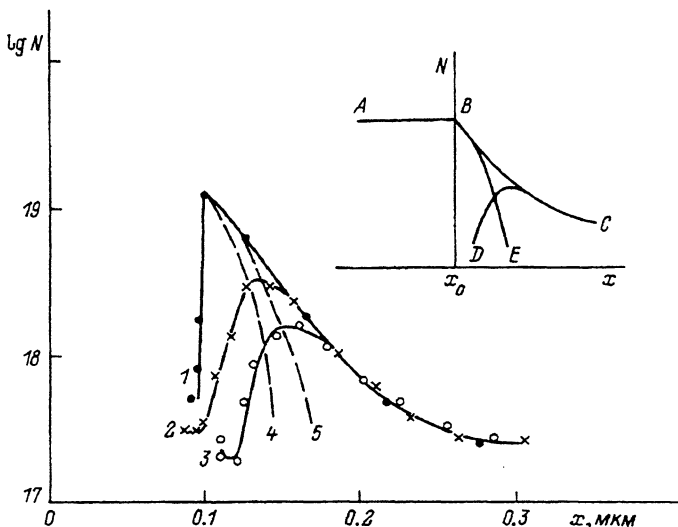
Транзисторные структуры были изготовлены по планарной технологии на эпитаксиальных слоях кремния, легированного фосфором, с удельным сопротивлением 4.0 Ом·см, причем базовая область была легирована бором, исходное распределение которого вблизи эмиттерного перехода приведено на рисунке (кривая 1). Эмиттер толщиной 3 мкм был создан термодиффузией фосфора, концентрация которого была  $2.5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

Распределение электрически активной примеси в эмиттерном переходе исследовалось методом  $C$ - $V$ -метрии с учетом подвижных зарядов в ООЗ [4]. Облучение гамма-потокom интенсивностью 364 рад/с производилось при комнатной температуре.

Как известно, профили распределения легирующей примеси, подобные приведенным на рисунке (кривые 1-3) и создающие тормозящее поле для инжектированных из эмиттера носителей, могут возникать при изготовлении транзисторов методом термодиффузии. При этом диффундирующая примесь (фосфор) из эмиттера проникает в базу и частично компенсирует акцепторную примесь (бор).

В связи с изложенным рассмотрим следующую модель. В эмиттерном переходе транзисторной структуры исходное распределение фосфора и бора задано соответственно кривыми  $AB$  и  $BC$  (вставка на рисунке). Кривая  $BE$ , полученная вычитанием экспериментальной кривой  $DC$  из кривой  $BC$ , представляет собой профиль распределения диффундирующей примеси (фосфор) в базе транзисторной структуры после облучения.

Так как при получении уравнения диффузии не делается никаких предположений о ее механизме, то можно воспользоваться его решением в рассматриваемом случае. Учитывая, что толщина эмиттера (3 мкм) значительно больше расстояния, на которое диффундирует фосфор ( $< 0.1$  мкм), диффузия может рассматриваться как происходящая из полубесконечного пространства в неограниченное тело (толщина базы исследуемых



Профили распределения электрически активных примесей в базе  $n-p-n$ -транзистора.

Бор: до облучения (1) и после  $\gamma$ -облучения дозой  $4 \cdot 10^6$  (2) и  $8 \cdot 10^6$  рад (3); фосфор: после  $\gamma$ -облучения дозой  $4 \cdot 10^6$  (4) и  $8 \cdot 10^6$  рад (5). Профили расчетные.

структур 1.4 мкм). Решение уравнения диффузии для этого случая хорошо известно

$$N = \frac{N_0}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{(x - x_0)}{2\sqrt{Dt}} \right], \quad (1)$$

где  $N_0$  — концентрация фосфора в эмиттере,  $D$  — коэффициент радиационно-стимулированной диффузии,  $t$  — время диффузии,  $\operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt})$  — дополнительная функция ошибок Гаусса,  $x_0$  представлено на рисунке.

Кривые 4 и 5, полученные из экспериментальных данных с помощью процедуры, описанной для получения кривой  $BE$  (вставка на рисунке), аппроксимировались уравнением (1) подбором величин  $N_0$  и  $Dt$ . Экспериментальные профили распределения фосфора, диффундирующего в базу транзисторной структуры (кривые 4 и 5 на рисунке), описываются уравнением (1) при значениях  $N_0 = 2.55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $Dt_1 = 2.5 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$  и  $Dt_2 = 5.0 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2$  соответственно. При использовании мощности дозы 364 рад/с время облучения  $t_1 = 1.1 \cdot 10^4 \text{ с}$  и  $t_2 = 2.2 \cdot 10^4 \text{ с}$ , что позволяет вычислить значение коэффициента РСД  $D = 2.27 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2/\text{с}$ . В случае термодиффузии коэффициент диффузии фосфора имеет такое же значение при 1090 К.

Поскольку используемые в работе интенсивности облучения и его дозы недостаточны ни для создания концентрации вакансий, способной оказать заметное влияние на низкотемпературные диффузионные процессы, ни для наблюдаемого ускорения диффузии вследствие передачи импульса диффундирующим атомам [1], то будем предполагать, что атомы фосфора при гамма-облучении совершают рекомбинационно-стимулированную диффузию [5]. Вычислим коэффициент диффузии в

этом случае. Пусть  $m$  — скорость изменения заряда атома фосфора при облучении,  $a$  — постоянная решетки кремния,  $p$  — число эквивалентных положений, в которые может попасть диффундирующий атом. Используя рассуждения, подобные тем, что используются в кинетической теории газов, можно записать соотношение для РСД

$$D = \frac{a^2 m}{p}. \quad (2)$$

Величина  $m$  вычислена в [5] и может быть представлена в виде

$$m = \frac{\gamma_p n}{1 + \frac{\gamma_p n}{\gamma_n} + N_c \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)}, \quad (3)$$

где

$$A = N - n + \frac{\gamma_p}{\gamma_n} N_v \exp\left(-\frac{E_g - E}{kT}\right),$$

$N$  — концентрация атомов диффундирующей примеси,  $n$  — концентрация высокоэнергетичных электронов,  $\gamma_p$  и  $\gamma_n$  — коэффициенты захвата дырок и электронов диффундирующими примесями,  $E$  — энергетическое расстояние от уровня примеси до зоны проводимости.

Оценки величины  $n$  при описанных условиях эксперимента показывают, что она не превосходит  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Используя известные значения для кремния и фосфора в кремнии величин  $\gamma_p$ ,  $\gamma_n$ ,  $N_c$ ,  $N_v$ ,  $E_g$ ,  $E$ , легко показать, что  $m = \gamma_p n$ . Поэтому уравнение (2) принимает вид

$$D = d \cdot F, \quad (4)$$

где

$$d = \frac{a^2 \gamma_p \beta \mu \tau}{p}$$

— удельный коэффициент радиационно-стимулированной диффузии,  $\beta$  — квантовый выход ионизации при гамма-облучении;  $\mu$  — коэффициент поглощения гамма-фотонов кремнием;  $F$  — мощность дозы при облучении;  $\tau$  — время жизни высокоэнергетичных электронов, созданных гамма-фотонами.

Экспериментальные исследования зависимости коэффициента радиационно-стимулированной диффузии от мощности дозы гамма-облучения (в интервале мощностей дозы 12–438 рад/с) подтвердили справедливость соотношения (4), причем коэффициент  $d$  оказался равным  $6.6 \pm 0.6 \times 10^{-19} \text{ см}^2/\text{рад}$ .

Обнаруженное в настоящей работе значительное ускорение диффузии фосфора при комнатной температуре кажется неожиданным, если учесть результаты работ по радиационно-стимулированной диффузии Au и Ag в кремнии [6,7], наблюдавшейся лишь при повышенных температурах. Однако кажущееся противоречие может быть обусловлено тем, что наблюдавшаяся в цитируемых работах диффузия Au и Ag происходила по механизму, отличному от механизма диффузии фосфора.

- [1] Вавилон В.С., Кив А.Е., Ниязова О.Р. Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. М.: Наука, 1981. 368 с.
- [2] Ланно М., Бургуэн Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. М.: Мир, 1984. 263 с.
- [3] Абакумов В.Н., Патомов А.А., Ясиевич И.Н. // ФТП. 1991. Т. 25. Вып. 9. С. 1489-1516.
- [4] Lehouec K. // Sol. St. Electron. 1984. Vol. 27. N 12. P. 1097-1105.
- [5] Мак В.Т., Розенфельд А.Б., Секрет А.А. и др. // Изв. вузов. Физика. 1989. № 4. С. 112-114.
- [6] Козловский В.В., Ломасов В.Н., Пилькевич Я.Я., Питкевич М.В. // ФТП. 1980. Т. 14. Вып. 10. С. 2043-2045.
- [7] Казаринов Ю.Н., Козловский В.В., Ломасов В.Н., Питкевич М.В. // ФТП. 1986. Т. 20. Вып. 9. С. 1577-1581.

Одесский университет им.И.И.Мечникова

Поступило в Редакцию  
23 марта 1992 г.  
В окончательной редакции  
28 сентября 1992 г.

12  
© 1993 г.

Журнал технической физики, т. 63, в. 3, 1993

## ОБ ОДНОВРЕМЕННОМ ИЗМЕРЕНИИ НЕСКОЛЬКИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ОБЛАСТИ ОБРАЗЦА ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДИКИ МИРАЖ-ЭФФЕКТА

*Р.А.Аюханов, Б.Байзаков, К.С.Музамедьяров, С.Х.Сулейманов*

Метод фототермического отклонения (мираж-эффект) как возможность контроля за изменением коэффициентов оптического поглощения, теплофизических констант и визуализации механических неоднородностей твердого тела разработана сравнительно давно [1] и наиболее полно описана в [2]. Однако теплофизические применения этого метода обычно ограничиваются измерениями температуропроводности [3,4], коэффициенты теплопроводности и теплоемкости отсюда могут быть найдены, но при условии, что один из этих коэффициентов уже известен. Ниже будет показано, что в сочетании с некоторыми вычислительными процедурами мираж-эффект обладает более широкими возможностями — позволяет одновременно находить несколько теплофизических коэффициентов и коэффициент оптического поглощения вблизи поверхности твердого тела<sup>1</sup> практически из одного эксперимента (из измерения величины отклонения и смещения фазы зондирующего луча при двух частотах модуляции луча накачки).

Пусть в полупространстве  $z < 0$  перпендикулярно плоскости  $XU$ , в которой находится поверхность образца, падает гармонически промодулированный по интенсивности с частотой  $\omega$  гауссовый пучок монохроматического света (назовем его лучом накачки), возбуждающий температурные волны в приповерхностной области внутри и вне образца (см.

<sup>1</sup> Эта же методика без каких-либо ограничений может быть применена для измерения коэффициентов в приповерхностном слое жидкости.