

05;06;10

## Исследование кремния, имплантированного ионами углерода

© С.В. Булярский, А.С. Амбровевич, С.С. Моливер,  
Т.А. Джабраилов, Р.М. Баязитов, Р.И. Баталов

Ульяновский государственный университет  
Казанский физико-технический институт РАН  
E-mail: ambra@sv.uven.ru

Поступило в Редакцию 12 октября 2000 г.

Двумя независимыми методами исследован кремний, имплантированный ионами углерода. Показано, что концентрацию имплантированного углерода можно контролировать с помощью дивакансий.

При имплантации углерода в кремний наряду с дефектами, содержащими углерод, появляются и дефекты самой кристаллической структуры (например, дивакансия).

Дивакансия является одним из основных электрически активных дефектов, она стабильна при комнатной температуре и поэтому доступна для исследования. Дивакансия является важным индикатором радиационных и технологических повреждений в кремнии. По их содержанию можно судить и о концентрации других дефектов. Например, возникающие при имплантации бора, фосфора и сурьмы дивакансии отчетливо дают сигнал, интенсивность которого пропорциональна количеству имплантированного вещества [1].

В данной работе исследовались образцы кремния *p*-типа, имплантированные ионами углерода с энергией 20 keV и дозой  $6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . В первой серии экспериментов были сняты спектры фотопроводимости в среднем ИК-диапазоне при температуре жидкого азота. Фотопроводимость возбуждалась светом глобара, пропущенным через монохроматор МДР-236, и измерялась селективным вольтметром В6-9 в режиме постоянного тока. Сравнение с известными спектрами [2] подтвердило наличие дивакансии в кремнии.

Во второй серии экспериментов для получения барьеров Шоттки на кремниевые пластики были нанесены пленки из золота гальваническим

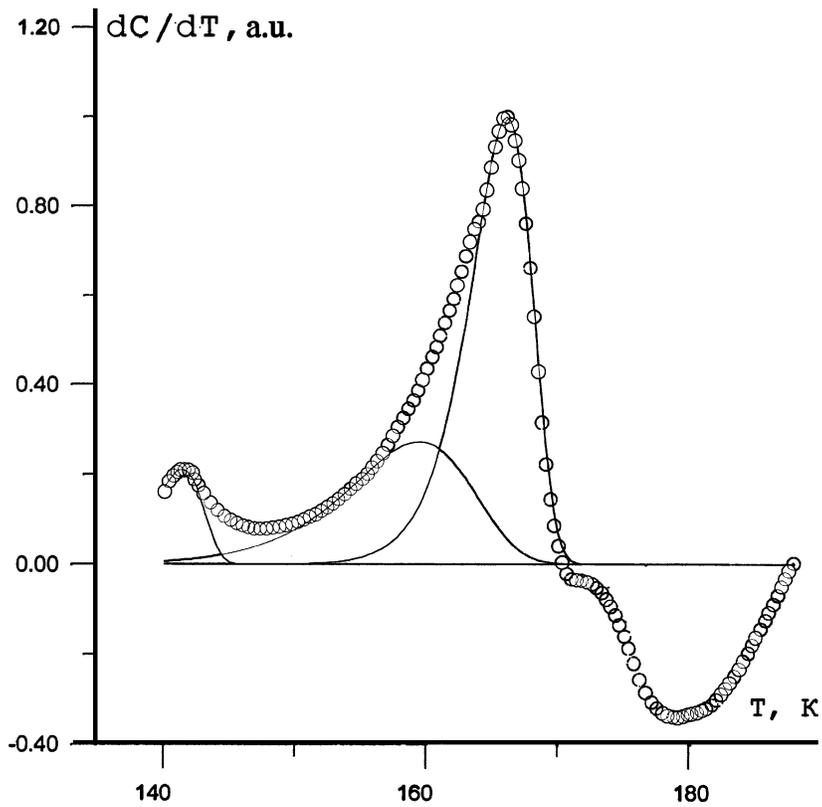


Рис. 1. Спектр ТСЕ при  $d = 47 \text{ nm}$ .

методом. Омический контакт осуществлялся напылением индия на обратные стороны пластинок на установке ВУП-5. Была измерена термостимулированная емкость (ТСЕ) барьеров Шоттки. Измерения проводились следующим образом [3,4]. При комнатной температуре к образцу прикладывалось напряжение прямого смещения (0.5 V) и образец охлаждался до температуры жидкого азота. Потом изменялась полярность напряжения на обратную (-2 и -3 V). Напряжение прямого смещения обеспечивает заполнение глубоких центров (ГЦ). Изменяя величину обратного напряжения, прикладываемого к образцу,

Параметры выявленных глубоких центров

$T_m$ , К	$E_t$ , eV	$\sigma$ , $\text{cm}^{-2}$	$N_t$ , $\text{cm}^{-3}$
$d = 47 \text{ nm}$			
141	0.23	$1.7 \cdot 10^{-18}$	$1.6 \cdot 10^{16}$
159	0.42	$4.9 \cdot 10^{-13}$	$1.6 \cdot 10^{16}$
166	0.27	$9.6 \cdot 10^{-19}$	$3.3 \cdot 10^{16}$
180	0.55	$2.3 \cdot 10^{-11}$	$1.8 \cdot 10^{16}$
$d = 57 \text{ nm}$			
145	0.23	$9.8 \cdot 10^{-19}$	$5.2 \cdot 10^{15}$
158	0.42	$5.1 \cdot 10^{-13}$	$5.0 \cdot 10^{15}$
166	0.27	$9.6 \cdot 10^{-19}$	$1.0 \cdot 10^{16}$
180	0.55	$2.3 \cdot 10^{-11}$	$6.0 \cdot 10^{15}$

мы меняем ширину области переменного заряда. Тем самым выявляем ГЦ, расположенные в разных глубинах залегания. В данном случае измерения проводились в глубинах залегания 47 и 57 nm. Измерения проводились в автоматизированном режиме таким образом. Через развязывающую схему  $L_1, C_1$  на образец подавалось постоянное напряжение  $U$ . Измеритель емкости (Е7-9) выдавал частоту  $f$ , отличающуюся от резонансной частоты колебательного контура  $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_0C_0})$ , к которому подключался образец. Частотомер (ЧЗ-63) измерял частоту  $f$  и выдавал цифровой код в канал данных. Управляющая программа вычисляла емкость. Термопара была присоединена к цифровому вольтметру (В7-46/1), данные с которого тоже поступали в канал данных. Полученную зависимость  $C(T)$  дифференцируем по формуле

$$\begin{aligned} \partial C / \partial T = & A(T/T_m)^2 \exp[E_t/k(1/T_m - 1/T)] \\ & \times \exp\left\{1 - (T/T_m)^2 \exp[E_t/k(1/T_m - 1/T)]\right\}, \end{aligned}$$

где  $A$  — амплитуда,  $E_t$  — энергия активации,  $T_m$  — температура максимума полученных пиков. В данном случае, что бывает часто, пики перекрываются. Разделение производилось с помощью вышеуказанной формулы. Спектры дифференцированной ТСЕ приведены на рис. 1 и 2. Параметры выявленных глубоких центров находятся в таблице.

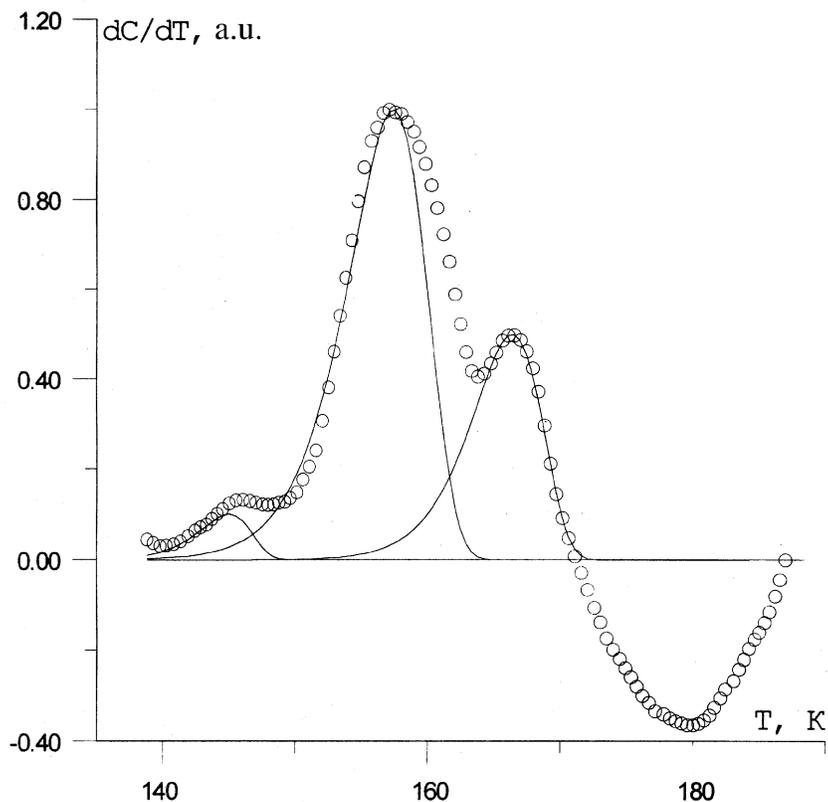


Рис. 2. Спектр ТСЕ при  $d = 57$  nm.

Эксперимент с ТСЕ выявил четыре ГЦ в обеих глубинах залегания. ГЦ при 141 (145) и 159 (158) К принадлежат дивакансии, ГЦ при 166 К соответствует положительно заряженному междуузельному углероду ( $C_1^+$ ) (4). Отрицательный ГЦ при 180 К, вероятно, тоже связан с имплантацией углерода, так как изменение глубины привело к изменению концентрации данного уровня. Как видно из таблицы, при первой и второй глубине каждой дивакансии примерно соответствуют два междуузельных углерода. Концентрация дефектов во втором случае

в три раза меньше, чем в первом случае. Таким образом, концентрацию имплантированного углерода можно контролировать с помощью дивансии.

Работа одного из авторов поддержана РФФИ (Моливер С.С., грант 98-02-03 327).

## Список литературы

- [1] *Avalos V., Dannefaer S.* // Phys. Rev. 1998. V. 58. N 3. P. 1331–1342.
- [2] *Humphreys R.G., Brand S., Jaros M.* // Phys. C: Sol. Stat. Phys. 1993. V. 16. N 12. P. L337–L343.
- [3] *Булярский С.В., Грушко Н.С.* Генерационно-рекомбинационные процессы в активных элементах. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 399 с.
- [4] *Булярский С.В., Радауцан С.И.* // ФТП. 1981. Т. 15. С. 1443–1446.
- [5] *Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С.* Действие излучений на полупроводники. М.: Наука, 1988. 192 с.