

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В СТРУКТУРАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОМОМНОГО КРЕМНИЯ

Макаренко Л.Ф.¹⁾, Коршунов Ф.П.²⁾, Ластовский С.Б.²⁾, Гуринович В.А.²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, г.Минск

²⁾ Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси, г.Минск

Углерод является важнейшей остаточной примесью в кремнии, которая определяет процессы образования основных, устойчивых при $T=300$ К дефектов межузельного типа в облученных кристаллах и приборах. Исследованию процессов взаимодействия углерода с собственными дефектами и другими примесями, его влиянию на процессы диффузии, посвящено большое количество работ (см. обзоры [1,2] и ссылки в них). Первоначальной стадией образования электрически активных межузельных комплексов является вытеснение углерода междоузельным атомом кремния (I) из узлового в межузельное положение. При комнатной и более высоких температурах межузельный углерод (C_i) становится подвижным и начинает мигрировать по кристаллу кремния до захвата либо межузельным кислородом (O_i), либо углеродом в узле (C_s), либо фосфором и т.д. [1]. При этом образуются электрически активные дефекты, которые и влияют на рабочие характеристики приборов.

Для прогнозирования изменения характеристик приборов под действием облучения и корректной интерпретации имеющихся экспериментальных данных по изучению влияния различных факторов на их радиационную стойкость необходимо иметь информацию о содержании остаточных примесей в уже готовых приборах. Для изготовления детекторных структур используется кремний с содержанием кислорода и углерода $\sim 10^{15}$ см⁻³. В настоящее время основными методами определения концентрации остаточных примесей в полупроводниках являются ИК-поглощение и масс-спектроскопия вторичных ионов. Однако эти методы непригодны для определения столь малого содержания углерода. Поэтому актуальной является задача разработки других подходов для определения характеристик столь чистых кристаллов кремния и изучения влияния технологических процессов изготовления прибора на их примесный состав.

Целью настоящей работы является анализ возможностей метода определения содержания углерода в кремниевых структурах с использованием емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS), и применение этого метода для определения содержания углерода в детекторах частиц, изготовленных из высокоомного кремния ($\rho=2-4$ кОм·см).

Рассмотрим более подробно суть используемого метода. Узловой углерод (C_s), согласно обменному механизму Уоткинса [1,2], при облучении выталкивается собственными межузельными атомами кремния (Si_i) из узла в межузельное положение. Отжигается C_i вблизи комнатной температуры путем диффузии к стокам (центрам захвата). В высокоомных кристаллах кремния основными центрами захвата межузельного углерода являются межузельные атомы кислорода (O_i) и углерода в узле. Кинетика отжига межузельного углерода описывается следующими уравнениями

$$\begin{cases} [C_i]' = -a[C_i] \cdot [C_s] - b[C_i] \cdot [O_i] & (1) \\ [C_i C_s]' = a[C_i] \cdot [C_s] & (2) \\ [C_i O_i]' = b[C_i] \cdot [O_i] & (3) \end{cases}$$

где $[C_i]'$, $[C_iC_s]'$, $[C_iO_i]'$ – скорости изменения концентраций междуузельного углерода (уровень $E_c-0,12$ эВ), комплекса междуузельный углерод–углерод в узле (уровень $E_c-0,17$ эВ) и комплекса междуузельный углерод–междуузельный кислород (уровень $E_v+0,34$ эВ). Экспериментально можно измерить скорость отжига междуузельного углерода $[C_i]'$ _{exp}, его начальную концентрацию $[C_i]_0$ и конечную концентрацию комплекса C_iC_s – $[C_iC_s]'$ _{exp}. Из уравнений (1)–(3) могут быть получены следующие соотношения:

$$\begin{cases} \frac{[C_iC_s]'}{[C_iO_i]'} = \frac{[C_iC_s]_{1exp}}{[C_i]_{0exp}} & (4) \\ [C_iC_s]' + [C_iO_i]' = -[C_i]_{exp}' & (5) \end{cases}$$

Из (1)-(5) мы можем определить $a[C_s]$ и $b[O_i]$. Если имеются материалы с известными концентрациями кислорода и углерода, то можно определить коэффициенты a и b , которые затем можно использовать для измерения концентраций этих примесей в других материалах.

Такая работа была проделана ранее с применением измерений ИК-поглощения [3] и измерений температурных зависимостей эффекта Холла [4]. Экспериментальные результаты этих работ несколько отличаются друг друга (см. Рис. 1). Как видно из рисунка ожидаемая погрешность определения содержания углерода тем выше, чем выше температура при которой определяется постоянная отжига C_i , то есть чем меньше содержание остаточных примесей.

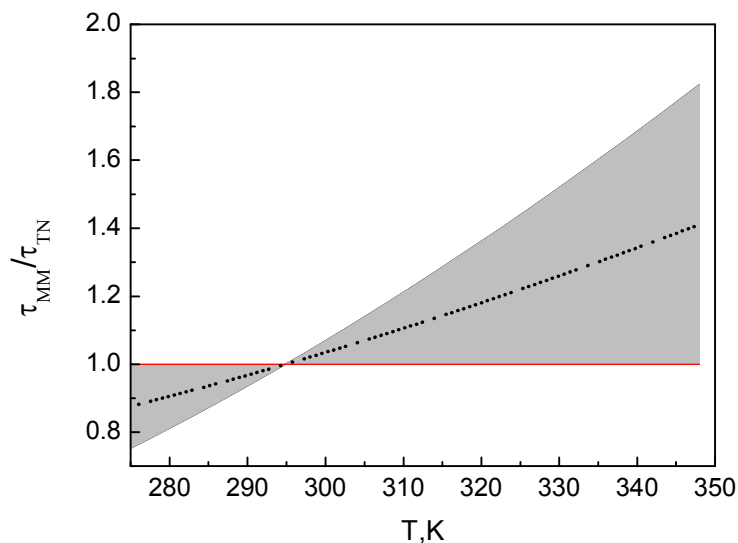


Рис. 1. Отношение калибровок для коэффициента b , полученные в работах [3]. Значение b , определенное в [4] принято за единицу.

Другое ограничение на применимость данного метода накладывается отношением содержания кислорода и углерода. Поскольку при отжиге междуузельного углерода параллельно протекают две реакции, то мы определяем сумму скоростей захвата:

$$\tau_{ann}^{-1} = \tau_{CO}^{-1} + \tau_{CC}^{-1} \quad (6)$$

Чтобы выделить первое слагаемое нам необходимо определить какая доля междуузельного углерода уходит на образование комплекса C_iC_s . Это можно сделать измеряя изменение концентрации ловушки с уровнем $E_c-0,17$ эВ (Рис. 2). Очевидно, что, чем меньшая доля C_i уходит на образование этого дефекта, тем больше погрешность определения содержания углерода.

Таким образом, определяя постоянную времени отжига межзельного углерода (см. Рис. 3), и концентрацию $C_i C_s$ (см. Рис.2), мы можем определить τ_{CC}^{-1} . Затем по данным работ [3,4] проводится вычисление концентрации углерода в исходной структуре.

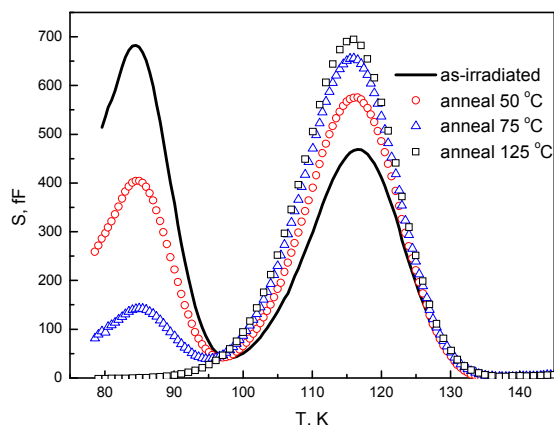


Рис. 2.. Спектры DLTS, полученные для различных структур после отжига при 350 К.

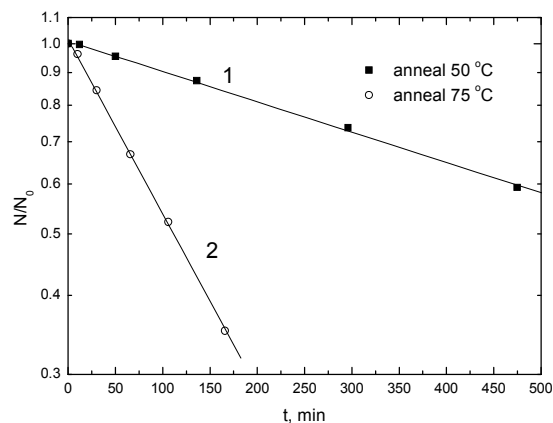


Рис. 2. Изменение концентрации межзельного углерода от времени отжига при 50 °C (1) и 75 °C (2).

В исследованном материале его концентрация составила $2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, что гораздо ниже предела обнаружения другими методами.

Хотелось бы также отметить еще одну особенность метода DLTS для определения содержания остаточных примесей. Этот метод позволяет определить профиль распределения ловушек по глубине структуры. То есть им можно контролировать процессы диффузии остаточных примесей в процессе изготовления приборов.

Заключение

Рассмотрены особенности применения метода емкостной спектроскопии для определения содержания остаточных примесей в диодах на основе выскоомного, «детекторного» кремния.

Отсутствие надежной калибровки приводит к появлению довольно больших погрешностей при определении концентрации углерода, которая возрастает с увеличением чистоты материала. Другим фактором, влияющим на величину погрешности является присутствие кислорода. Желательно, чтобы соотношение между концентрациями кислорода и углерода не превышало 10.

В то же время использование метода емкостной спектроскопии позволяет проследить, как изменяется содержание остаточных примесей при различных технологических процессах.

Литература

- [1] G. Davies and R.C. Newman: *Handbook on Semiconductors*, edited by T.S. Moss (Elsevier Science, Amsterdam, 1994), Vol. 3b, p. 1557.
- [2] G Davies et al 1987 *Semicond. Sci. Technol.* 2 524.
- [3] A K Tipping et al 1987 *Semicond. Sci. Technol.* 2 315-317.
- [4] V.P Markevich and L.I. Murin, *Soviet Physics- Semiconductors*, 1988 -Vol. 22, p. 574.
- [5] B.C MacEvoy, G. Hall, *Mater. Sci. Semicond. Processing*, 1 (2000) pp. 243-249.