

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ КОМПЛЕКСА ВАКАНСИЯ - ДВА АТОМА КИСЛОРОДА В КРЕМНИИ

Л.И. Мурин¹, В.П. Маркевич¹, И.Ф. Медведева¹, J.L. Lindstrom²

¹Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси

²Lund University, Division of Solid State Physics, Lund, Sweden

Введение. Комплекс вакансия – два атома кислорода (VO_2) является одним из основных радиационных дефектов, образующихся в кристаллах кремния, выращенных методом Чохральского (Cz-Si), в результате облучения при повышенных температурах (350-450 °C), а также при отжиге комплекса VO ($T = 300-400$ °C) в кристаллах, облученных при $T \leq 300$ °C [1-4]. В комплексе VO_2 два атома кислорода насыщают все четыре оборванные связи вакансии и длительное время считалось, что данный дефект не проявляет электрической активности. Его присутствие в облученных кристаллах обнаруживалось по полосе ИК-поглощения у 895 см^{-1} , обусловленной валентными колебаниями атомов кислорода.

Только совсем недавно [5] было установлено, что в действительности комплекс VO_2 является бистабильным и существует другая, метастабильная, конфигурация этого центра – VO_2^* , в которой один атом кислорода находится в вакансии, а второй атом занимает междоузельное положение на центре Si-Si связи. Значение энергии для такой конфигурации только на 0,25 эВ выше энергии основного состояния комплекса VO_2 и при высоких температурах заметная часть комплексов может находиться в состоянии VO_2^* . В частности, при повышении температуры от 250 °C до 480 °C равновесное заполнение метастабильного состояния повышается от ~5 до ~20% [5]. Наличие достаточно высокого барьера (~2 эВ) между состояниями VO_2^* и VO_2 позволяет при быстром охлаждении от высоких температур заморозить неравновесное заполнение состояния VO_2^* и исследовать свойства дефекта в данной конфигурации. Было установлено [5], что метастабильному комплексу VO_2^* принадлежат колебательные полосы у $928,4$ и $1003,7 \text{ см}^{-1}$ и были найдены некоторые указания на его электрическую активность. В настоящей работе впервые экспериментально показано, что в состоянии VO_2^* комплекс вакансия – два атома кислорода действительно является электрически активным центром с акцепторным уровнем, расположенным у $E_c - 0,05$ эВ.

Методика эксперимента. Исследовались кристаллы Cz-Si n-типа с удельным сопротивлением $1 \div 60 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Для получения высокой концентрации комплексов VO_2 образцы облучались при комнатной температуре быстрыми электронами ($E = 10 \text{ МэВ}$, $F = 5 \cdot 10^{16} - 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$), а затем отжигались при температуре 320 °C в течение 30 часов. Спектры ИК поглощения измерялись на Фурье спектрометре Bruker IFS 113v. Спектральное разрешение составляло $0,5-1,0 \text{ см}^{-1}$, образцы измерялись при комнатной температуре и при 20 К.

Для электрических измерений кристаллы n-Cz-Si облучались электронами с энергией 4 МэВ и γ -квантами ^{60}Co при комнатной температуре, затем последовательно проходили термообработки при 320°C (30 часов), 480 °C (3-5 минут) и 250 °C (до 50 часов). Барьеры Шоттки изготавливались термическим напылением Au. Ловушки электронов исследовались с помощью метода релаксационной спектроскопии глубоких уровней (DLTS). Измерения эффекта Холла проводились в интервале температур 77 - 400 К и использовались для определения положения энергетического уровня дефекта.

Экспериментальные результаты и обсуждение. Комплекс VO_2^* можно рассматривать как А-центр (комплекс VO), находящийся вблизи междоузельного атома кислорода. Можно ожидать, что в этой конфигурации дефект, аналогично А-центру, будет проявлять электрическую активность. А-центр может наблюдаться в спектрах ИК поглощения в двух зарядовых состояниях: нейтральном и отрицательно заряженном. При низких температурах полоса для нейтрального состояния расположена у 836 см^{-1} , для отрицательного зарядового состояния она смещается к 885 см^{-1} [6]. Исследования образцов Si n-типа, облученных относительно небольшими дозами быстрых электронов, показали, что в таких кристаллах наблюдается сдвиг колебательных полос, соответствующих VO_2^* , к новым положениям у $966,8$ и $1023,3\text{ см}^{-1}$ (рис. 1, спектры 1, 2). По аналогии с А-центром можно предполагать, что эти полосы связаны с отрицательно заряженным состоянием комплекса VO_2^* .

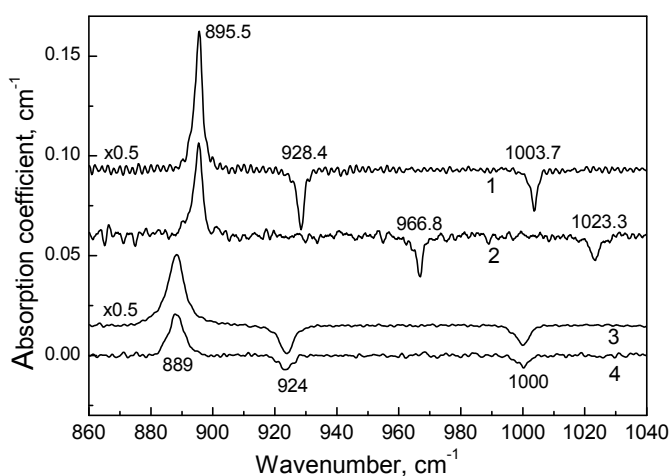


Рис. 1. Фрагменты разностных спектров поглощения, полученных при вычитании спектров, измеренных после отжига образцов n-Cz-Si ($[O_i] = 1 \cdot 10^{18}$, $[C_s] = 1 \cdot 10^{16}$, $[P] = 5 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$) при 480 °C в течение 5 минут из спектров, измеренных после отжига при 250 °C в течение 50 часов. Образцы облучены электронами с энергией 10 МэВ (1, 3 - $F = 4 \cdot 10^{18}\text{ см}^{-2}$; 2, 4 - $F = 9 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-2}$). 1, 2 – измерения при 20 К; 3, 4 – измерения при 300 К.

В спектрах, измеренных при комнатной температуре (спектры 3 и 4), положение полос комплекса VO_2^* для образцов Si n-типа совпадает с таковым для образцов, сильнокомпенсированных облучением. Этот факт подразумевает, что акцепторный уровень комплекса VO_2^* является относительно мелким и все дефекты VO_2^* при комнатной температуре находятся в нейтральном зарядовом состоянии.

Исследования электрических свойств облученных кристаллов n-Cz-Si, прошедших комплексные обработки (320 °C 30 часов + 480 °C 5 минут + 250 °C 50 часов) показали, что комплекс VO_2^* действительно является электрически активным дефектом с мелким акцепторным уровнем в верхней половине запрещенной зоны. На рис. 2 показаны температурные зависимости концентрации свободных электронов, полученные из измерений эффекта Холла, для одного из образцов после отжигов при 480 и 250 °C . Видно, что в области низких температур эти зависимости заметно отличаются вследствие присутствия дефекта с мелким акцепторным уровнем (по отношению к дну зоны проводимости) после термообработки при 480 °C . Анализ зависимости концентрации электронов от положения уровня Ферми в материале показывает, что акцепторный уровень дефекта, поведение которого соответствует таковому для VO_2^* , расположен у $E_C - 0,055 \pm 0,01\text{ эВ}$.

На рисунке 3 представлены спектры DLTS, полученные в температурном интервале 30-80 К для аналогичных образцов n-Cz-Si после их отжига при 480 и 250 °C . В спектрах доминирует пик с максимумом при $T = 36\text{ К}$ (E_{36}). Максимальное значение амплитуды пика E_{36} имеет место после кратковременной выдержки образцов при $T = 480\text{ °C}$. Последующие отжиги при температуре 250 °C приводят к существенному уменьшению

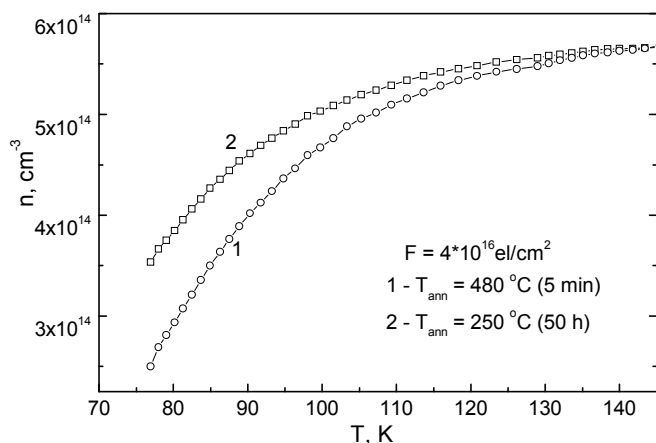


Рис.2. Температурные зависимости концентрации носителей тока в кристаллах n-Cz-Si ($[O_i] = 1,1 \times 10^{18}$, $[C_s] = 5 \times 10^{15}$, $[P] = 6 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$), облученных электронами с энергией 4 МэВ ($F = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) прошедших термообработки: кривая 1 - 320 °C (30 часов) + 480 °C (5 мин), кривая 2 - 320 °C (30 часов) + 480 °C (5 мин) + 250 °C (50 часов).

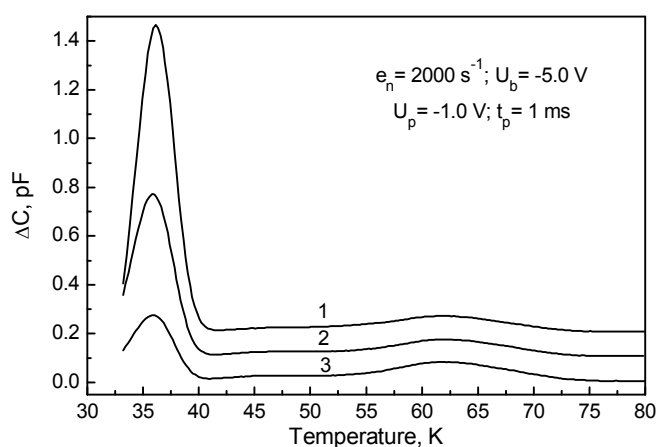


Рис. 3. Фрагменты DLTS-спектров образцов Cz-Si ($[O_i] = 1,1 \times 10^{18}$, $[C_s] = 5 \times 10^{15}$, $[P] = 6 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$), облученных электронами с энергией 4 МэВ ($F = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и отожженных при 320 °C в течение 30 часов. 1- после последующего отжига при 480 °C в течение 5 минут; 2 и 3 после дальнейших отжигов при 250 °C в течение 6 и 50 часов, соответственно.

амплитуды пика E_{36} . Скорость этого процесса соответствует скорости трансформации комплекса вакансия-два атома кислорода из метастабильного состояния (VO_2^*) в основное (VO_2) при температуре 250 °C [5]. Этот факт позволяет практически однозначно идентифицировать ловушку E_{36} как комплекс VO_2^* . Из зависимостей Аррениуса найдено, что энергия активации эмиссии электронов для этой ловушки составляет величину $\sim 0,05$ эВ.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф04МС-029), ГКТН РБ и INTAS (грант 03-50-4529).

1. J.W. Corbett, G.D. Watkins and R.S. McDonald. Phys. Rev. **135**, 5A, 1381(1964).
2. B.G. Svensson and J.L. Lindstrom. Phys. Rev. **34**, 12, 8709 (1986).
3. J.L. Lindstrom, L.I. Murin, V.P. Markevich, T. Hallberg and B.G. Svensson,. Physica B: Condensed Matter. **273-274**, 291(1999).
4. J.L. Lindstrom, L.I. Murin, T. Hallberg, V.P. Markevich, B.G. Svensson, M. Kleverman and J. Hermansson. Nucl. Inst. and Meth. in Physics Research B **186**, 121 (2002).
5. J.L. Lindstrom, L.I. Murin, B.G. Svensson, V.P. Markevich and T. Hallberg. Physica B:Condensed Matter. **340-342**, 509 (2003).
6. L.I. Murin, V.P. Markevich, T. Hallberg and J.L Lindström. Solid State Phenomena **69-70**, 309 (1999).