

Влияние олова на реакции, протекающие с участием межузельного углерода в облученном кремнии

© Л.И. Хируненко[¶], О.А. Кобзарь, Ю.В. Помозов, М.Г. Соснин, Н.А. Трипачко

Институт физики Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

(Получена 6 августа 2002 г. Принята к печати 6 сентября 2002 г.)

Проведено исследование влияния легирования оловом на реакции, протекающие с участием межузельного углерода в кремнии. Показано, что Sn в кремнии является эффективным стоком для межузельного углерода, в результате чего в кремнии, легированном оловом, не наблюдается образования центров $C_I O_I$ и $C_I C_S$, характерных для кремния, а возникают центры $C_I Sn_S$. Центры $C_I O_I$ и $C_I C_S$ образуются в Si:Sn после отжига обнаруженных комплексов $C_I Sn_S$. Установлено, что атомы C_I могут располагаться в двух различных положениях относительно атомов олова. Проведено рассмотрение процесса радиационного дефектообразования в Si:Sn в приближении квазихимических реакций. Получены выражения для зависимостей концентраций основных радиационных дефектов от содержания олова, проведено сопоставление с экспериментальными результатами.

1. Введение

Как известно, и олово (Sn), и углерод (C) в кремнии являются изовалентными примесями замещения. Легирование этими элементами приводит к значительному локальному возмущению решетки, однако знак создаваемых деформаций в случае олова и углерода противоположный (ковалентный радиус олова $R_{Sn} = 1.44 \text{ \AA}$, углерода $R_C = 0.77 \text{ \AA}$, а кремния $R_{Si} = 1.17 \text{ \AA}$). Олово в кремнии при облучении эффективно взаимодействует с вакансиями (V) с образованием центра SnV [1,2], что приводит к снижению эффективности образования радиационных дефектов, содержащих вакансии [3–5]. Узловой углерод (C_S), согласно обменному механизму Воткинса [6], при облучении выталкивается собственными межузельными атомами кремния (Si_I) из узла в межузельное положение в соответствии с реакцией $C_S + Si_I \rightarrow C_I + Si_S$ [6,7]. Отжигается C_I вблизи комнатной температуры путем диффузии. При диффузии значительная часть C_I в кремнии, полученном методом Чохральского, локализуется вблизи межузельного кислорода O_I с образованием центров $C3$ ($C_I O_I$) [8,9]. C_I также эффективно взаимодействуют с узловым углеродом с образованием центров $C_I C_S$, с элементами III и V групп и др. [10–12]. Эффективность образования тех или иных центров, содержащих C_I , зависит от примесного состава исходных кристаллов и от концентрации компонент, входящих в состав дефекта. Повлиять на вероятность реакций можно, создавая конкурирующие реакции захвата межузельного углерода.

Влияние олова на параметры кремния исследовалось довольно широко. Однако в литературе практически отсутствуют данные об исследовании влияния легирования оловом на реакции, связанные с участием междоузлий в облученном кремнии. В работах [13,14] отмечается, что олово не влияет на реакции, связанные с участием межузельного углерода в кремнии, в частности на скорость

введения центров $C_I O_I$. В работах [15,16] при исследовании Si:Sn методом DLTS обнаружены новые полосы, которые авторы связывают с центрами, возникающими вследствие взаимодействия узловых атомов олова Sn_S с атомами C_I .

В настоящей работе приводятся полученные нами новые данные о влиянии легирования кремния оловом на процессы образования радиационных дефектов, протекающие с участием атомов межузельного углерода.

2. Образцы и методика эксперимента

В работе исследовались монокристаллические образцы кремния, выращенные методом Чохральского, *n*-типа проводимости (легированные фосфором). Концентрация фосфора составляла $(3–4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Содержание олова определялось нейтронно-активационным анализом и с помощью рентгеновского микроанализатора JСХА-733 и изменялось от $2 \cdot 10^{18}$ до $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Концентрация углерода оценивалась по полосе поглощения 607 см^{-1} и составляла от $2.3 \cdot 10^{16}$ до $2.9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Все исследуемые образцы содержали сравнимые концентрации кислорода $(5–6) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Для выявления особенностей влияния легирования оловом на процессы радиационного дефектообразования для сравнения использовались образцы кремния, не содержащие олова, но со сравнимым содержанием углерода и кислорода.

Образцы облучались на микротроне электронами с энергией 5 МэВ при температуре $\sim 80 \text{ К}$. Доза облучения составляла $(2–5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Образцы без нагрева перегружались в криостат для измерений или в специальное устройство для отжигов. Исследовались спектры поглощения образцов сразу после облучения и после последующего изохронного отжига (20 мин) в интервале температур $T_a = 80–550 \text{ К}$ с шагом 5–20 К с помощью фурье-спектрометра IFS-113v. Спектры поглощения измерялись при температурах $T = 300$ и 10 К в области $8000–500 \text{ см}^{-1}$ со спектральным разрешением 0.5 см^{-1} .

[¶] E-mail: lukh@iop.kiev.ua
Fax: 380 44 265 55 88

3. Экспериментальные результаты

Проведенные исследования показали, что легирование кремния оловом не приводит к существенным изменениям исходных электрических и оптических параметров кремния. Ранее было показано, что возмущение кислорода (квазимолекул Si_2O) близлежащими атомами олова приводит к появлению дополнительных линий поглощения в области, соответствующей межзельному кислороду [17]. Аналогичный эффект обнаружен нами при исследованиях спектра поглощения углерода замещения C_S в образцах $\text{Si}:\text{Sn}$. В спектрах поглощения в окрестности полосы 607 см^{-1} , соответствующей колебательной моде C_S , в $\text{Si}:\text{Sn}$ нами обнаружены три новые полосы с частотами 642.8 , 591.1 и 562.4 см^{-1} (рис. 1). Интенсивности полос растут как с повышением содержания углерода, так и с повышением концентрации олова в образцах. Это позволяет сделать предположение, что наблюдаемые полосы соответствуют колебанию C_S , возмущенному атомами олова, расположенными в близлежащих координационных сферах. Присутствие трех полос может быть обусловлено неэквивалентным расположением атомов C_S и Sn_S .

На рис. 2 приведены спектры поглощения, измеренные при $T = 10\text{ К}$, для образцов $\text{Si}:\text{Sn}$ с концентрацией олова $1.9 \cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$ сразу после облучения при температуре $T \approx 80\text{ К}$. Как видно из рис. 2, сразу после облучения спектры поглощения для $\text{Si}:\text{Sn}$ в исследуемой области идентичны известным спектрам для Si и в $\text{Si}:\text{Sn}$ не наблюдается никаких дополнительных полос по сравнению с контрольным Si . Наиболее интенсивные полосы ~ 922 и $\sim 932\text{ см}^{-1}$ соответствуют локальным колебательным модам C_I , а полоса $\sim 6903\text{ см}^{-1}$ соответствует электронному переходу, связанному с центром C_I [5]. При изохронном отжиге облученного кремния в области температур $T_a = 250\text{--}300\text{ К}$ в кремнии происходит отжиг центров C_I , сопровождающийся одновременным появлением комплексов C_IO_I и C_IC_S [8,9,18]. В кристаллах, легированных оловом, в отличие от специально не легированного кремния, при $T_a \gtrsim 250\text{ К}$

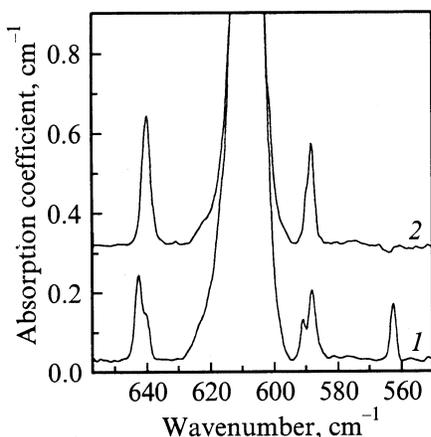


Рис. 1. Спектры поглощения $\text{Si}:\text{Sn}$ (1) и Si (2) при $T = 10\text{ К}$.

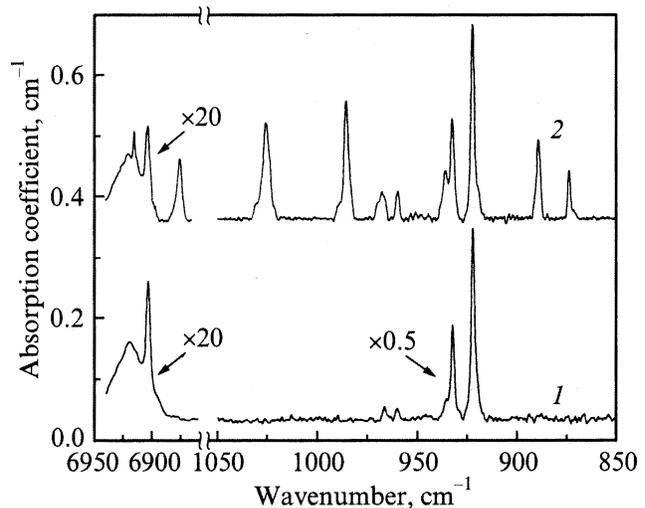


Рис. 2. Спектры поглощения $\text{Si}:\text{Sn}$, облученного электронами при 80 К дозой $5 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-2}$, до (1) и после (2) отжига при $T = 255\text{ К}$. Температура измерения $T = 10\text{ К}$, концентрация олова $1.9 \cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$.

в процессе отжига C_I в спектрах поглощения обнаружено появление 6 новых полос поглощения с волновыми числами 873.5 , 888.9 , 985.3 , 1025.3 , 6915 и 6875 см^{-1} и не наблюдается появления полос, соответствующих центрам C_IO_I и C_IC_S (рис. 2, кривая 2). Исследования образцов с различным содержанием олова и углерода показали, что интенсивности всех 6 полос поглощения зависят от концентрации как углерода, так и олова в образцах: чем выше их содержание, тем интенсивнее полосы поглощения.

Полосы поглощения 888.9 , 985.3 и 6915 см^{-1} одновременно достигают максимальной интенсивности при температуре отжига $T_a \approx 260\text{ К}$ и затем при $T_a > 270\text{ К}$ начинают синхронно отжигаться. Трансформация спектров поглощения при изохронном отжиге $\text{Si}:\text{Sn}$ для полос 888.9 и 985.3 см^{-1} показана на рис. 3. Полный отжиг всех трех полос поглощения происходит одновременно при температуре $T_a \approx 280\text{ К}$. В процессе отжига полос 888.9 , 985.3 и 6915 см^{-1} не наблюдается никаких особенностей в динамике и характере отжига C_I в $\text{Si}:\text{Sn}$ по сравнению с кремнием. Идентичность поведения полос поглощения 888.9 , 985.3 и 6915 см^{-1} во время отжига свидетельствует о принадлежности их одному и тому же центру.

Полосы поглощения 873.5 , 1025.3 и 6875 см^{-1} растут непрерывно по интенсивности с отжигом и достигают максимума при полном отжиге C_I . На рис. 3 приведены результаты изохронного отжига для полос 873.5 и 1025.3 см^{-1} . Как видно из рис. 3, после полного отжига C_I не наблюдается появления центров C_IO_I и C_IC_S . Следует отметить, что в образцах $\text{Si}:\text{Sn}$ температура отжига C_I постепенно снижается с увеличением содержания олова в образцах. Если в кремнии C_I отжигаются при 300 К , то в образцах $\text{Si}:\text{Sn}$ с концентрацией

олова $N_{\text{Sn}} = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ температура отжига составляет $\sim 295 \text{ К}$, а при $N_{\text{Sn}} = 1.9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ температура отжига снижается до 285 К . Ускорение отжига C_I , по-видимому, связано с упругими полями, возникающими вследствие различия ковалентных радиусов атомов матрицы и олова.

Отсутствие после отжига межузельного углерода в образцах Si:Sn полос поглощения, соответствующих центрам $C_I O_I$ и $C_I C_S$, и зависимость интенсивностей наблюдаемых новых дополнительных полос поглощения от содержания углерода в образцах позволяют сделать предположение, что в образцах, легированных оловом, в отличие от специально не легированного кремния, при отжиге основная часть C_I уходит на образование центров, ответственных за наблюдаемые дополнительные полосы поглощения.

При температуре отжига $T_a \gtrsim 323 \text{ К}$ полосы 873.5 и 1025.3 см^{-1} начинают уменьшаться по интенсивности и отжигаются синхронно при $T_a \approx 383 \text{ К}$ (рис. 3, кривые 4, 5). Следует отметить, что при повышении температуры измерения до комнатной полосы 873.5 и 1025.3 см^{-1} сдвигаются в низкочастотную область спектра, максимумы располагаются при 865.5 и 1010.4 см^{-1} соответственно. Полоса 6875 см^{-1} отжигается идентично полосам 873.5 и 1025.3 см^{-1} . Картина отжига полос 873.5 , 1025.3 и 6875 см^{-1} , так же как и полос 888.9 , 985.3 и 6915 см^{-1} , не зависит от содер-

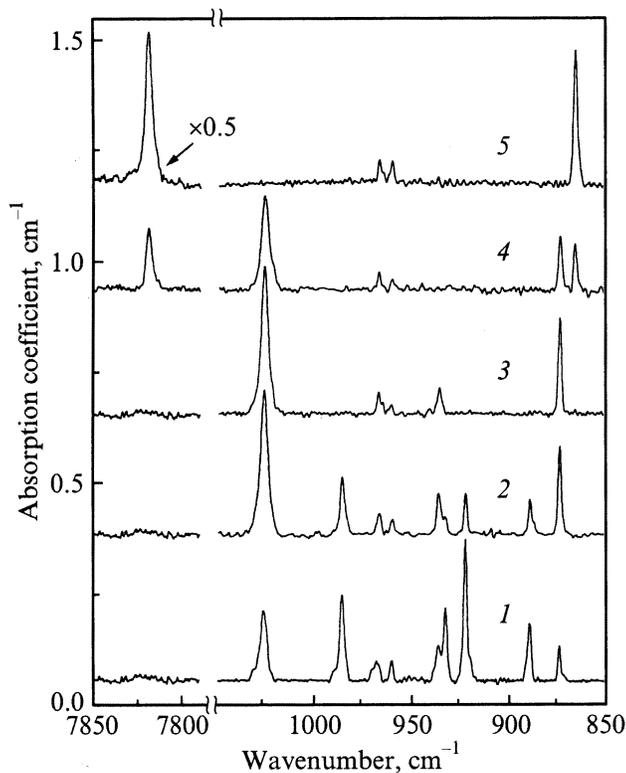


Рис. 3. Изохронный отжиг облученного электронами Si:Sn с концентрацией олова $1.9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Температура отжига T_a , К: 1 — 260, 2 — 273, 3 — 305, 4 — 353, 5 — 383.

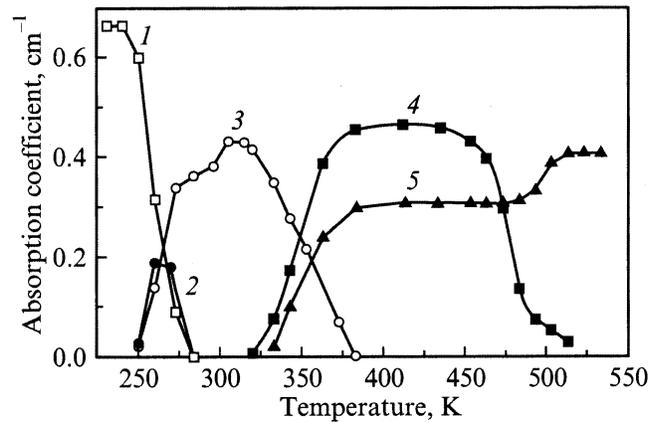


Рис. 4. Трансформация радиационных дефектов при отжиге облученного Si:Sn. 1 — C_I , 2 — $(C_I \text{Sn}_S)^*$, 3 — $(C_I \text{Sn}_S)^{2N}$, 4 — $C_I C_S$, 5 — $C_I O_I$.

жания олова в образцах для всех исследуемых в работе концентраций олова. В процессе отжига полос 873.5 , 1025.3 и 6875 см^{-1} наблюдается синхронное появление полос поглощения, соответствующих центрам $C_I O_I$ и $C_I C_S$. На рис. 3 (кривые 4, 5) приведены наиболее интенсивные полосы для этих центров 865.7 см^{-1} ($C_I O_I$) и 7819.7 см^{-1} ($C_I C_S$).

Была проведена оценка соотношения концентраций центров C_I и $C_I O_I$ для кремния без олова и кремния, легированного оловом, имеющих сравнимые исходные концентрации углерода и кислорода. Сравнение проводилось по площади под соответствующими полосами поглощения. Результаты показали, что в случае как Si, так и Si:Sn это соотношение одинаково, т.е. результирующая концентрация центров $C_I O_I$ не зависит от содержания олова в образцах.

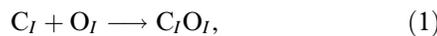
Полная картина трансформации радиационных дефектов при отжиге в интервале температур $T_a = 230\text{--}550 \text{ К}$ для образцов с содержанием олова $1.9 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ показана на рис. 4. Как видно из рис. 4, при отжиге полос 888.9 , 985.3 и 6915 см^{-1} наблюдается увеличение концентрации центров, которым соответствуют полосы поглощения 873.5 , 1025.3 и 6875 см^{-1} . Увеличение концентрации центров $C_I O_I$ при $T_a \gtrsim 473 \text{ К}$ происходит вследствие освобождения C_I при отжиге комплексов $C_I C_S$. Картина трансформации центров при отжиге идентична для всех исследуемых концентраций Sn в Si.

4. Обсуждение результатов

Полосы поглощения 873.5 , 1025.3 и 6875 см^{-1} наблюдались ранее в [15,16] и, согласно предложенной авторами модели, соответствуют центрам $C_I \text{Sn}_S$. Первые две полосы связываются с локальными колебаниями $C_I \text{Sn}_S$, а третья с электронным переходом. При теоретическом рассмотрении модели центров $C_I \text{Sn}_S$ в [16] авторами были рассмотрены различные возможные расположения

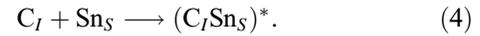
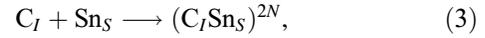
атомов межзельного углерода относительно атомов олова: в 1, 2 и 3-й конфигурационных сферах. Наиболее устойчивой предполагается конфигурация $(C_I Sn_S)^{2N}$, в которой атом C_I расположен во 2-й конфигурационной сфере относительно Sn_S . При этом могут реализоваться два неэквивалентных расположения атомов межзельного углерода относительно Sn_S , в одном из которых система имеет минимальную энергию (авторы принимают ее равной нулю), а во втором энергия системы на 0.25 эВ больше и эта конфигурация должна быть менее стабильной. Расположение атомов C_I в 3-й конфигурационной сфере относительно олова близко по энергии ко второму случаю и дает дефект с энергией на 0.3 эВ выше минимальной. Наименее энергетически выгодным является расположение атомов межзельного углерода в 1-й координационной сфере относительно олова (энергия повышается до 0.5–0.8 эВ). Полосы поглощения с частотами 873.5, 1025.3 и 6875 cm^{-1} авторы связывают с конфигурацией $(C_I Sn_S)^{2N}$, которой соответствует минимальная энергия, и соответственно с атомами C_I , расположенными во 2-й координационной сфере относительно олова. Придерживаясь модели, предложенной в [15,16], и учитывая наблюдаемые в эксперименте особенности поведения всех 6 дополнительных полос поглощения, новые полосы 888.9, 985.3 и 6915 cm^{-1} можно соотнести с менее устойчивой конфигурацией расположения атомов межзельного углерода во 2-й или в 3-й конфигурационной сфере относительно олова, $(C_I Sn_S)^*$. Наблюдаемое при отжиге полос 888.9, 985.3 и 6915 cm^{-1} увеличение концентрации центров, которым соответствуют полосы поглощения 873.5, 1025.3 и 6875 cm^{-1} , при неизменном характере отжига C_I , свидетельствует о том, что в процессе отжига происходит перестройка центров из конфигурации $(C_I Sn_S)^*$ в конфигурацию $(C_I Sn_S)^{2N}$.

Как следует из изложенных в предыдущем разделе полученных экспериментальных данных, присутствие в решетке кремния атомов Sn существенно влияет на процесс трансформации радиационных дефектов при отжиге облученного при 80 К кремния. Рассмотрим наблюдаемый в эксперименте процесс трансформации радиационных дефектов при отжиге в приближении квазихимических реакций. Проанализируем отдельно две стадии отжига в Si:Sn — стадию отжига межзельного углерода и стадию отжига центров $C_I Sn_S$. В специально не легированном кремнии в процессе отжига межзельного углерода основными реакциями, определяющими процесс дефектообразования, являются реакции



В случае кремния, легированного оловом, согласно полученным экспериментальным результатам, к процессу радиационного дефектообразования добавляются следу-

ющие реакции:



Реакции (3) и (4) описывают образование двух неэквивалентных типов центров $C_I Sn_S$, соответствующих тройкам полос 873.5, 1025.3 и 6875 cm^{-1} и 888.9, 985.3, 6915 cm^{-1} соответственно.

Соответствующая этим реакциям система кинетических уравнений может быть записана в следующем виде:

$$\frac{dN_{C_I}}{dt} = -k_{C_I, Sn_S}^{2N} N_{C_I} N_{Sn_S} - k_{C_I, Sn_S}^* N_{C_I} N_{Sn_S} - k_{C_I, O_I} N_{C_I} N_{O_I} - k_{C_I, C_S} N_{C_I} N_{C_S}, \quad (5)$$

$$\frac{dN_{(C_I Sn_S)^{2N}}}{dt} = k_{C_I, Sn_S}^{2N} N_{C_I} N_{Sn_S}, \quad (6)$$

$$\frac{dN_{(C_I Sn_S)^*}}{dt} = k_{C_I, Sn_S}^* N_{C_I} N_{Sn_S}, \quad (7)$$

$$\frac{dN_{C_I O_I}}{dt} = k_{C_I, O_I} N_{C_I} N_{O_I}, \quad (8)$$

$$\frac{dN_{C_I C_S}}{dt} = k_{C_I, C_S} N_{C_I} N_{C_S}, \quad (9)$$

где N_i обозначают концентрации соответствующих компонент, коэффициенты $k_{i,j}$ характеризуют вероятности взаимодействий между компонентами i и j .

Интегрируя уравнения (5)–(9) с учетом того, что $N_{C_I} \ll N_{Sn_S}$, а также того, что основная часть межзельного углерода при отжиге уходит на образование комплексов со Sn_S и, следовательно, концентрации O_I и C_S можно считать постоянными на этой стадии отжига, получаем следующие выражения для концентраций центров:

$$N_{(C_I Sn_S)^{2N}} = N_{C_I} \times \frac{k_{C_I, Sn_S}^{2N} N_{Sn_S}}{(k_{C_I, Sn_S}^{2N} + k_{C_I, Sn_S}^*) N_{Sn_S} + k_{C_I, O_I} N_{O_I} + k_{C_I, C_S} N_{C_S}}, \quad (10)$$

$$N_{(C_I Sn_S)^*} = N_{C_I} \times \frac{k_{C_I, Sn_S}^* N_{Sn_S}}{(k_{C_I, Sn_S}^{2N} + k_{C_I, Sn_S}^*) N_{Sn_S} + k_{C_I, O_I} N_{O_I} + k_{C_I, C_S} N_{C_S}}, \quad (11)$$

$$N_{C_I O_I} = N_{C_I} \times \frac{k_{C_I, O_I} N_{O_I}}{(k_{C_I, Sn_S}^{2N} + k_{C_I, Sn_S}^*) N_{Sn_S} + k_{C_I, O_I} N_{O_I} + k_{C_I, C_S} N_{C_S}}, \quad (12)$$

$$N_{C_I C_S} = N_{C_I} \times \frac{k_{C_I, C_S} N_{C_S}}{(k_{C_I, Sn_S}^{2N} + k_{C_I, Sn_S}^*) N_{Sn_S} + k_{C_I, O_I} N_{O_I} + k_{C_I, C_S} N_{C_S}}. \quad (13)$$

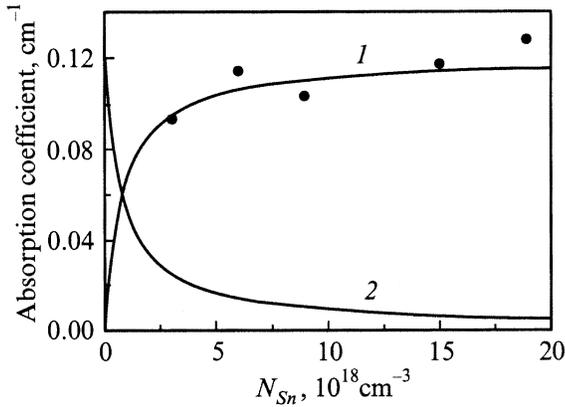
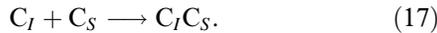
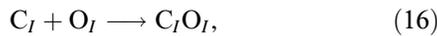


Рис. 5. Зависимости концентрации центров $C_I Sn_S$ (1) и $C_I O_I$ (2) от содержания олова в кремнии, построенные согласно (10) и (12). Точки — экспериментальные данные для полосы 1025.3 см^{-1} .

Из анализа полученных выражений (10–13) видно, что образование центров $C_I O_I$ и $C_I C_S$ должно подавляться присутствием олова, что и наблюдалось нами экспериментально.

Как указывалось выше, образование центров $C_I O_I$ и $C_I C_S$ происходит при отжиге центров $C_I Sn_S$. Этот процесс может быть описан следующими реакциями:



Соответствующую этим реакциям систему кинетических уравнений можно записать в виде

$$\frac{dN_{(C_I Sn_S)^{2N}}}{dt} = -\frac{dN_{(C_I Sn_S)^{2N}}}{\tau^{2N}}, \quad (18)$$

$$\frac{dN_{(C_I Sn_S)^*}}{dt} = -\frac{dN_{(C_I Sn_S)^*}}{\tau^*}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{C_I}}{dt} = & \frac{N_{(C_I Sn_S)^{2N}}}{\tau^{2N}} + \frac{N_{(C_I Sn_S)^*}}{\tau^*} \\ & - k_{C_I, O_I} N_{C_I} N_{O_I} - k_{C_I, C_S} N_{C_I} N_{C_S}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{dN_{C_I O_I}}{dt} = k_{C_I, O_I} N_{C_I} N_{O_I}, \quad (21)$$

$$\frac{dN_{C_I C_S}}{dt} = k_{C_I, C_S} N_{C_I} N_{C_S}, \quad (22)$$

где постоянные времени τ^{2N} и τ^* описывают скорости распада центров $(C_I Sn_S)^{2N}$ и $(C_I Sn_S)^*$ соответственно.

Из уравнений (18)–(22), с учетом исходных для данного процесса значений концентраций дефектов (10)–(13),

получаем выражения для концентраций центров $C_I O_I$ и $C_I C_S$:

$$N_{C_I O_I} = \frac{k_{C_I, O_I} N_{C_I} N_{O_I}}{k_{C_I, O_I} N_{O_I} + k_{C_I, C_S} N_{C_S}}, \quad (23)$$

$$N_{C_I C_S} = \frac{k_{C_I, C_S} N_{C_I} N_{C_S}}{k_{C_I, O_I} N_{O_I} + k_{C_I, C_S} N_{C_S}}. \quad (24)$$

Как видим, согласно полученным выражениям конечные концентрации центров $C_I O_I$ и $C_I C_S$ не должны зависеть от содержания олова в образцах.

На рис. 5 представлены полученные теоретические зависимости концентраций центров $(C_I Sn_S)^{2N}$ и $C_I O_I$ от содержания олова в образцах, построенные согласно выражениям (10) и (12). Зависимости для $(C_I Sn_S)^{2N}$ и $(C_I Sn_S)^*$ аналогичны и отличаются только постоянным множителем. Это же соблюдается и для центров $C_I O_I$ и $C_I C_S$. Для центров $C_I Sn_S$ проведено сравнение с полученными экспериментальными данными (точки на кривой, соответствующие интенсивности в максимуме полос поглощения). Как видим, наблюдается удовлетворительное качественное согласие теоретической и экспериментальной зависимостей. Для центров $C_I O_I$ и $C_I C_S$ провести такое сравнение не представляется возможным, так как в экспериментах полосы поглощения, соответствующие этим центрам, не наблюдаются ни при каких исследуемых концентрациях олова в кремнии. Действительно, оцененное из теоретической зависимости значение коэффициента поглощения в максимуме полосы, соответствующей центру $C_I O_I$, для минимального исследуемого содержания олова должно составить $\sim 0.03 \text{ см}^{-1}$, что находится ниже предела чувствительности эксперимента.

5. Заключение

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что атомы олова в кремнии при облучении являются эффективными ловушками для атомов межузельного углерода. В результате этого взаимодействия возникают комплексы $C_I Sn_S$. При этом атомы C_I могут находиться в двух различных конфигурациях относительно атомов узлового олова. В результате взаимодействия C_I и Sn_S значительно подавляется эффективность введения центров, содержащих межузельный углерод. Проведенное теоретическое рассмотрение процессов трансформации основных радиационных дефектов при отжигах качественно удовлетворительно описывает наблюдаемые экспериментально зависимости концентрации центров от содержания олова в образцах.

Список литературы

- [1] G.D. Watkins. *Radiation Damage in Semiconductors*, ed. by P. Baruch (Dunod, Paris, 1965) p. 97.
- [2] G.D. Watkins. *Phys. Rev. B*, **12**, 5824 (1975).
- [3] G.D. Watkins. *Phys. Rev.*, **155**, 802 (1967).
- [4] A. Brelot. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **19**, 220 (1972).

- [5] G. Davies, A.S. Oates, R.C. Newman, R. Woolley, E.C. Lightowlerst, M.J. Binns, J.G. Wilkes. *J. Phys. C: Sol. St. Phys.*, **19**, 841 (1986).
- [6] E.V. Lavrov, M. Fanciulli. *Physica B*, **302–303**, 263 (2001).
- [7] E.V. Lavrov, M. Fanciulli, M. Kaukonen, R. Jones, P.R. Briddon. *Phys. Rev. B*, **64**, 125 212 (2001).
- [8] G.D. Watkins. *Phys. Rev. B*, **12**, 4383 (1975).
- [9] A. Nylandsted Larsen, J.J. Goubet, P. Mejlholm, J. Sherman Christensen, M. Fanciulli, J. Wulff Petersen, A. Resende, M. Kaukonen, R. Jones, S. Öberg, P.R. Briddon, B.G. Svensson, J.L. Lindström, S. Dannefaer. *Phys. Rev. B*, **62**, 4535 (2000).
- [10] A. Brelet, J. Charlemagne. *Radiation Effects in Semiconductors*, ed. by J.W. Corbett and G.D. Watkins (Gordon and Breach, London, 1971) p. 161.
- [11] В.Б. Неймаш, М.Г. Соснин, Б.М. Туровский, В.И. Шаховцев, В.Л. Шиндич. *ФТП*, **16** (5), 901 (1982).
- [12] B.G. Svensson, J. Svensson, J.L. Lindström, G. Davies, J.M. Corbett. *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 2257 (1987).
- [13] R.C. Newman, A.R. Bean. *Rad. Eff.*, **8**, 189 (1971).
- [14] J.M. Trombetta, G.D. Watkins. *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 1103 (1987).
- [15] R.C. Newman, A.R. Bean. *Rad. Eff.*, **8**, 189 (1971).
- [16] M.T. Asom, J.L. Benton, R. Sauer, L.C. Kimerling. *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 256 (1987).
- [17] L.W. Song, X.D. Zhan, B.W. Benson, G.D. Watkins. *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 460 (1988).
- [18] L.C. Kimerling, M.T. Asom, J.L. Benton, P.J. Drevinsky, C.E. Cafer. *Mater. Sci. Forum*, **38–41**, 141 (1989).

Редактор Л.В. Шаронова

The role of tin in reactions with participation of carbon interstitials in irradiated silicon

L.I. Khirunenko, O.A. Kobzar, Yu.V. Pomozov, M.G. Sosnin, N.A. Tripachko

Institute of Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev 28, Ukraine

Abstract An investigation of the influence of tin on reactions with the interstitial carbon participation in electron irradiated silicon has been carried out. The results obtained demonstrate that Sn atoms are effective sinks for carbon interstitials in silicon. Consequently, the formation of $C_I O_I$ and $C_I C_S$ centers, typical for silicon, are not observed during the annealing of C_I , but $C_I Sn_S$ centers do appear. $C_I O_I$ and $C_I C_S$ centers arise in Si:Sn after annealing $C_I Sn_S$ complexes only. It was found, that C_I atoms are located in two different configurations in regard to tin atoms. The processes of radiation defects formation in Si:Sn were considered in the quasichemical reactions approximation. The dependences of the main radiation defect concentrations on tin content were obtained and comparison with experimental results was made.