

ФОРМИРОВАНИЕ И ОТЖИГ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ЛЕГИРОВАННЫХ ОЛОВОМ КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ p-ТИПА

В.В. Литвинов¹, А.Н. Петух¹, Ю.М. Покотило¹, В.П. Маркевич², С.Б. Ластовский²

¹Белорусский государственный университет

пр. Независимости 4; 220050 Минск, Беларусь, e-mail: aif-minsk@ibb.by, pokotilo@bsu.by

²Научно-практический центр НАНБ по материаловедению

ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Беларусь

Исследовалось влияние олова на формирование и отжиг радиационных дефектов в кристаллах германия p-типа, облученных электронами с энергией 6 МэВ при температуре 80 К. Показано, что в облученных кристаллах Ge:Sn,Ga доминируют акцепторные комплексы SnV с энтальпией ионизации дырок при 0,16 эВ, а в процессе отжига в области температур 110-150 °С идет формирование глубоких центров с донорным уровнем при $E_v+0,29$ эВ, который предположительно приписывается комплексу олово-междоузельный атом галлия.

Введение

Недавно [1, 2] было показано, что атомы олова являются эффективной ловушкой для вакансий в кристаллах Ge:Sn, облученных быстрыми электронами при 80 К. Комплексу Sn-V был приписан акцепторный уровень с энтальпией ионизации дырок в валентную зону 0,19 эВ. Установлено также, что отжиг центра Sn-V при температуре 60-100 °С в легированных фосфором кристаллах сопровождается освобождением вакансий и образованием комплексов фосфор-вакансия (VP), которые, становясь подвижными при $T \geq 100$ °С, захватываются атомами олова с образованием устойчивых вплоть до температуры 250 °С комплексов SnVP. Центрам SnVP приписана дырочная ловушка с энергией активации для эмиссии дырок 0,21 эВ [2,3].

В данной работе исследуется влияние олова на формирование и отжиг радиационных дефектов в кристаллах германия p-типа.

Методика эксперимента

Исследовались кристаллы Ge:Sn,Ga, легированные оловом и галлием в процессе роста. Концентрация олова в исследуемых кристаллах была на уровне 10^{16} - 10^{17} см⁻³, что на 3-4 порядка превышало концентрацию легирующих примесей. В качестве образцов сравнения использовались нелегированные оловом кристаллы с содержанием примеси Ga на уровне 8×10^{12} см⁻³. Концентрация междоузельного кислорода в образцах контролировалась методом инфракрасного поглощения и в исследуемых образцах не превышала 1×10^{15} см⁻³. Образцы облучались электронами с энергией 6 МэВ дозой 5×10^{13} см⁻², находясь в жидком азоте, и подвергались изохронному (30 мин) отжигу в области температур (30-290) °С.

Результаты измерений

Представленные на рис. 1 и 2 температурные зависимости концентрации дырок (p) после облучения и последующего нагрева кристаллов до комнатной температуры указывают на ионизацию в области температур 95-120 К дефектов с энергетическими уровнями в нижней половине запрещенной зоны. Отжиг этих дефектов сопровождается снижением концентрации дырок в высокотемпературной области зависимости $p(T)$, что

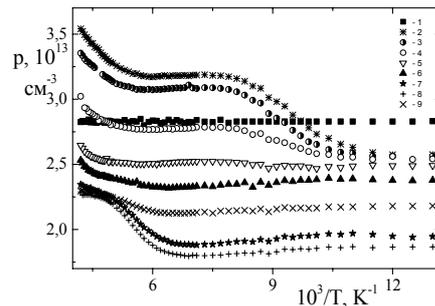


Рис. 1 Температурные зависимости концентрации дырок для образца Ge:Sn,Ga в исходном состоянии (1), после облучения и самопроизвольного нагрева до комнатной температуры (2) и последующего изохронного отжига при 30 °С (3), 50 °С (4), 70 °С (5), 90 °С (6), 130 °С (7), 150 °С (8), 290 °С (9)

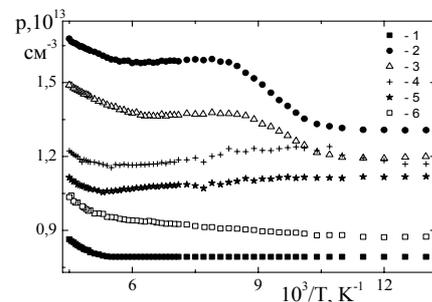


Рис. 2. Температурные зависимости концентрации дырок для образца Ge:Ga в исходном состоянии (1), после облучения и самопроизвольного нагрева до комнатной температуры и последующего изохронного отжига при 50 °С (2), 90 °С (3), 150 °С (4), 190 °С (5) и 210 °С (6)

указывает на акцепторный характер принадлежащих им уровней. Кроме того, в процессе изохронного отжига кристаллов Ge:Sn,Ga при температурах 100-150 °С идет формирование более глубокого центра с ионизацией при температурах 160-200 К. Отжиг этого дефекта при $T > 170$ °С сопровождается повышением концентрации дырок в низкотемпературной области зависимости $p(T)$, что указывает на донорный характер принадлежащих ему уровней.

На рис. 3 представлены температурные зависимости свободной энергии ионизации наблюдаемых центров (ΔE), которая рассчитана по данным рис. 1 и 2 на основе уравнения электро-

нейтральности [1] и связана с энтальпией (ΔH) и энтропией (ΔS) ионизации дефектов соотношением: $\Delta E = \Delta H - T\Delta S$. Полученные данные свидетельствуют о введении в Ge:Sn,Ga двух дефектов с энтальпией ионизации $0,16 \pm 0,01$ эВ (Д1) и $0,29 \pm 0,01$ эВ (Д2), а в Ge:Ga – одного дефекта с энтальпией ионизации $0,17 \pm 0,01$ эВ (Д3). Значения энтропии ионизации указанных центров были в интервале (6,5 - 7,5)к.

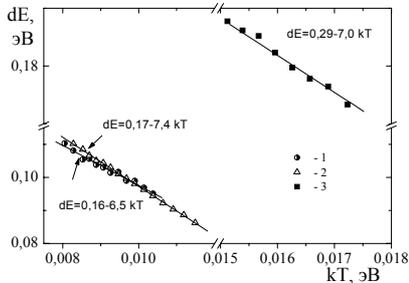


Рис. 3. Температурные зависимости свободной энергии ионизации (dE) по данным рис.1 (зависимости 2 и 8) и рис.2 (зависимость 2) для образцов Ge:Sn,Ga (1 и 3) и Ge:Ga (2).

Представленные на рис. 4 изменения концентрации наблюдаемых центров с температурой изохронного отжига показывают различную температурную устойчивость акцепторных центров Д1 (30-90 °С) и Д3 (130-150 °С) в образцах Ge:Sn,Ga и Ge:Ga соответственно. Формирование центра Д2 в кристаллах Ge:Sn,Ga происходит при температурах (110-150) °С, а сам центр устойчив вплоть до температур 290 °С.

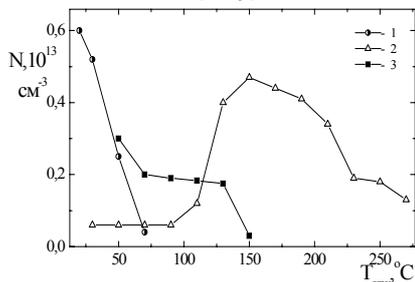


Рис. 4. Зависимость концентрации (N) центров Д1 (1), Д2 (2) и Д3 (3) от температуры изохронного отжига образцов Ge:Sn,Ga (1 и 2) и Ge:Ga (3).

Обсуждение результатов

Разница на примерно 60 °С в интервалах температур отжига акцепторных центров Д1 и Д3 в образцах Ge:Sn,Ga и Ge:Ga не позволяет приписать их одному и тому же дефекту несмотря на близость величин энтальпии их ионизации (0,16 эВ для Д1 и 0,17 эВ для Д3). Следует также отметить, что концентрация центра Д1 в Ge:Sn,Ga примерно в 2 раза выше наблюдаемого значения для Д3 в нелегированных оловом кристаллах

Ge:Ga при одинаковых дозах облучения. Энергия ионизации и температуры отжига центров Д1 и Д3 хорошо согласуются с таковыми для комплексов SnV [1,2] и дивакансии [4], соответственно, в кристаллах германия.

Относительно природы донорного центра Д2 с энтальпией ионизации дырок при 0,29 эВ можно отметить следующее. Тот факт, что этот центр наблюдается только в легированных оловом образцах, указывает на его связь с атомами Sn. Формирование центра Д2 не коррелирует со стадией диссоциации комплекса SnV (Д1), что делает маловероятным участие в его образовании вакансий. Этот центр не наблюдался методом DLTS в процессе отжига легированных Sn и фосфором кристаллов Ge, что может быть свидетельством возможной связи центра Д2 с легирующей примесью Ga.

Возможным механизмом формирования Д2 может быть взаимодействие атомов олова с междоузельными атомами Ga (Ga_i), которые согласно [5] могут образовываться путем вытеснения атомов галлия из узлов собственными междоузельными атомами Ge (механизм замещения по Уоткинсу). Интересно, что междоузельным атомам Ga (Ga_i) принадлежит, по данным [5], донорный уровень с энтальпией ионизации дырок 0,34 эВ, близкой к наблюдаемой для дефекта Д2. Все это указывает на возможную принадлежность дефекта Д2 одной из конфигураций комплекса олово-междоузельный атом галлия ($SnGa_i$).

Заключение

Установлено, что облучение кристаллов Ge:Sn,Ga электронами с энергией 6 МэВ приводит к преимущественному введению комплексов SnV с энтальпией ионизации дырок $0,16 \pm 0,01$ эВ, в то время как в нелегированных оловом кристаллах р-типа доминирующим дефектом является дивакансия с близкой энтальпией ионизации дырок $0,17 \pm 0,01$ эВ. В процессе отжига облученных кристаллов Ge:Sn,Ga обнаружено формирование при температурах (110-150) °С дефектов с донорным уровнем при $E_v + 0,29$ эВ, который предположительно приписан комплексу олово-междоузельный атом галлия ($SnGa_i$).

Список литературы

1. Литвинов В.В. и др. // В сб. научных трудов IV Межд. Научн/ конф. «Материалы и структуры современной электроники», Минск, 2010, с.168-171
2. Markevich V.P. et.al. // JAP. – 2011. – 109. – С.083705.
3. Markevich V.P. et.al. // Sol. State Phen., 2011, в печати.
4. Petersen M.C. et.al. // Phys. Rev. – 2010. – B82. – С.075203.
5. Kolkovski V. et.al. // Phys. Rev. – 2008. – B78. – С.233201.

FORMATION AND ANNEALING OF RADIATION-INDUCED DEFECTS IN p-TYPE Ge CRYSTALS DOPED WITH TIN

V.V. Litvinov¹, A.N. Petuch¹, Ju.M. Pokotilo¹, V.P. Markevich², S.B. Lastovskii²

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus; af-minsk@ibb.by

²Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk 220072

Effects of tin impurity atoms on formation and annealing of defects induced in p-type germanium crystals by irradiation with 6 MeV electrons at 80 K have been studied. It is shown that the dominant defect induced by the irradiation in Ge:Sn,Ga is tin-vacancy complex, which has an acceptor level with enthalpy of hole ionization 0.16 eV. Upon annealing of the irradiated Ge:Sn,Ga crystals in the temperature range 110-150 °C a defect with a donor level at $E_v + 0.29$ eV is formed. It is suggested that this level is related to a complex incorporating tin and interstitial gallium atoms.