Uzbek Journal of Physics
Vol.20(№5) 2018 PP.324-326

ОСТАТОЧНЫЕ ЭФФЕКТЫ В КРЕМНИИ С ПРИМЕСЯМИ Т-ИОНОВ, ПОДВЕРГНУТОМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМУ СЖАТИЮ

Ш.Б. Утамурадова

Национальный университет РУз им. Мирзо Улугбека, Ташкент, Узбекистан
sh-utamuradova@yandex.ru
(Получена 22.02.2018)

Чуқур сатҳлар ностационар сиғимли спектроскопия усули ёрдамида Т-ионлар билан легирланган кремнийда гидростатик сиқиш таъсиридаги қолдиқ эффектлар ўрганилган. 5–70 кбар оралиқдаги гидростатик сиқиш E_c–0.22 эВ ва E_c–0.42 эВ чуқур сатҳларнинг термик фаоллашиш энергиясининг ўзгаришига олиб келиши аниқланган.

С помощью нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней исследованы остаточные эффекты в кремнии, легированном примесями Т-ионов и подвергнутом всестороннему сжатию. Показано, что воздействие всестороннего сжатия в интервале 5–70 кбар приводит к остаточному изменению термической энергии активации уровней E_c–0.22 эВ и E_c–0.42 эВ.

By means of nonstationary capacitance spectroscopy of deep levels the residual effects in silicon doped with impurities of T-ions and subjected to uniform compression are investigated. It is shown that the effect of compression in the range of 5–70 kbar leads to a residual change of the thermal activation energy of the levels E_c–0.22 eV and E_c–0.42 eV.

В последние годы уделяется большое внимание исследованиям в области высоких давлений. В значительной мере это обусловлено интересными физическими явлениями, происходящими в кристаллах при воздействии высоких давлений [1-2]. Высокое гидростатическое сжатие приводит к существенным изменениям зонной структуры полупроводников, в частности, к смещению энергетических уровней. В однородных полупроводниках смещение энергетических уровней и связанное с этим изменение спектра носителей тока приводит, в свою очередь, к сильным изменениям оптических, электрических, механических и многих других свойств кристаллов. В некоторых случаях возникшие при сжатии свойства сохраняются и после снятия давления [3-4].

В настоящей работе приводятся результаты исследования остаточных явлений после гидростатического упругого сжатия образцов кремния, легированного примесями Т-ионов: марганца, железа и хрома. Образцы для исследований были вырезаны из монокристалла кремния *n*-типа, выращенного методом Чохральского, с удельным сопротивлением 5–10 ом·см. Диаметр образцов 3–4 мм, толщина 1 мм, ориентация в плоскости [111]. Примеси марганца, железа и хрома вводили в кремний диффузионным путем при 1200°С в течение 2-х часов с последующей закалкой в масле. Диффузионные *p*-*n*-переходы в образцах создавали до диффузии примесей. Образцы *n*-Si<Mn>, *n*-Si<Fe> и *n*-Si<Cr> хранили в жидком азоте, т.к. длительное хранение их при комнатной температуре приводит к уменьшению концентрации глубоких уровней (ГУ) [5].

Параметры и концентрацию ГУ перед обработкой давлением тщательно измеряли с помощью нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DTLS) и вольт-фарадных характеристик (ВФХ). Эти измерения показали, что во всей партии использованных для эксперимента диодов концентрация и параметры ГУ были идентичными. В экспериментах использована камера высокого давления типа "Тороид" [3].

В качестве модельной примеси будем рассматривать атомы хрома в кремнии. Измерения параметров глубоких уровней в кремнии *n*-типа, легированного хромом, показали, что воздействие высокого гидростатического давления в интервале 5–70 кбар приводит к остаточному изменению термической энергии активации E_t уровней E_c–0.20 эВ и E_c–0.41 эВ. Анализ типичных спектров DLTS образцов *n*-Si<Cr> и зависимостей Аррениуса, полученных из этих спектров до и после обработки давлением, показал, что в результате воздействия высокого давления энергии активации E_t уровней E_c–0.21 эВ и E_c–0.41 эВ уменьшаются до E'_t, т.е. оба ГУ сдвигаются по направлению к зоне проводимости, причем более глубокий уровень сдвигается с большей скоростью.

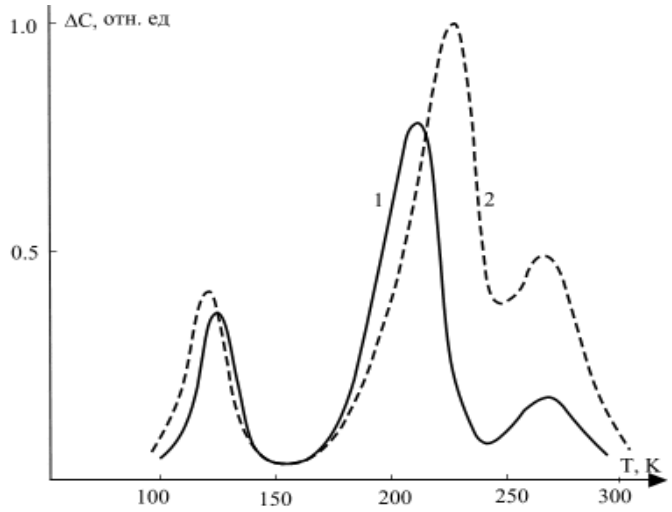


Рис. 1. Спектры DLTS *n*-Si<Cr> до (*1*) и после (*2*) воздействия давления. P=70 кбар, t_g= 30 мин.

Изменение энергии активации обоих уровней определяется выражением:

$$\Delta E = E_t - E'_t ,$$

где E'_t – энергия активации уровня после воздействия давления. ΔE линейно зависит от давления. Максимальное ΔE_t при 70 кбар достигает значения 0.035 эВ для уровня E_c–0.21 эВ и 0.1 эВ для ГУ E_c–0.41 эВ.

Подобное уменьшение энергии активации уровней наблюдалось и для примесей марганца и железа в кремнии. Аналогичное уменьшение энергии активации ГУ, связанных с марганцем в кремнии, наблюдалось нами ранее при давлении в интервале 5–70 кбар, но максимальное значение ΔE_t и соответствующий коэффициент давления ГУ $\gamma = d\Delta E/dP$, полученные в [5], были в 2–3 раза меньше, чем в данной работе.

Уровень E_c–0.41 эВ, связанный с хромом в кремнии, обнаруживает немонотонную зависимость ΔE_t от времени воздействия давления: он имеет максимум при t_g=40 мин и при дальнейшем увеличении t_g величина ΔE_t быстро уменьшается. Коэффициент давления γ глубокого уровня E_c–0.41 эВ также зависит от времени воздействия давления: при разных t_g γ изменяется от 8×10^{-12} эВ/Па до $2/3\times10^{-11}$ эВ/Па.

Концентрация уровня E_c–0.41 эВ в результате воздействия давления растет и в максимуме (60 кбар, t_g=40 мин) увеличивается примерно вдвое по сравнению со стартовым значением. Длительное хранение диодов *n*-Si<Cr> при комнатной температуре приводит к тому, что термическая энергия активации и концентрация этого уровня частично возвращаются к значениям, которые наблюдались до воздействия давления.

Увеличение концентрации ГУ E_c–0.41 эВ для хрома и E_c–0.42 эВ для марганца в кремнии можно объяснить следующим образом. Известно, что значительная часть атомов Т-ионов, введенных в объем кремния путем высокотемпературной диффузии, находится в электронейтральном состоянии. Электронно-микроскопические исследования показывают, что неактивная часть атомов Т-ионов осаждается в виде атмосферы вокруг дислокаций или других структурных дефектов. Наличие таких примесных атмосфер искажает кристаллическую решетку и нарушает ее периодичность. Поэтому возможно, что гидростатическое давление, в первую очередь, сильно влияет на такие преципитаты, в результате происходит частичное (возможно, и полное) расщепление и распад преципитатов. Освобожденные при этом атомы Т-ионов могут мигрировать в соседние междоузлия и стать электрически активными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физика и материаловедение полупроводников с глубокими уровнями. Под ред. В.И. Фистуля (Москва, Металлургия, 1987).
2. В.И. Фистуль. Атомы легирующих примесей в полупроводниках (Москва, Физматлит, 2004).
3. А.А. Полякова. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов (Москва, Энергия, 1979).
4. К. Рейви. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. Пер. с англ. (Москва, Мир, 1984).
5. К.П. Абдурахманов, А.А. Лебедев, Б.А. Котов, Й. Крейсль, Ш.Б. Утамурадова, ФТП **19**, №2, 349 (1985).
6. Ш.Б. Утамурадова, Ш.Х. Далиев, Ж.С. Рахмонов, Докл. АН РУз №6, 45 (2009).
7. Ш.Б. Утамурадова, Ж.С. Рахмонов, Ш.Х. Далиев, Естественные и технические науки РАН № 2(40),31 (2009).