Uzbek Journal of Physics
Vol.20(№1) 2018 PP.32-36

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ ОБРАЗЦАХ Si<Mn> И Si<Zn>

С. Зайнабидинов[1], О. Химматкулов[2], И.Г. Турсунов[3]

[1]Андижанский государственный университет, Андижан, Узбекистан
[2]Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан
[3]Национальный университет РУз, Ташкент, Узбекистан
(Получена 07.11.2017)

Компенсацияланган Si<Mn> ва Si<Zn> намуналарининг босимнинг P = 0–5×10^8 Па ва ҳароратнинг T = 273–300 К оралиғида ўтказувчанлик турига, компенсациялаш даражасига боғлиқ ҳолда динамик тензоўтказувчанлиги ўрганилган. Mn ва Zn намунларнинг ионлашиш энергиялари $E_{Mn} = E_c$–0.52 эВ, $E_{Zn} = E_c$–0.54 эВ ва босим коэффициентлари α_{Mn} = 1.81×10^{-11} эВ/Па, α_{Zn} = 1.4×10^{-11} эВ/Па аниқланган.

В работе исследованы динамическая тензопроводимость и физические механизмы её проявления при импульсных воздействиях давления в образцах Si<Mn> и Si<Zn> в зависимости от степени их компенсации и типа проводимости в диапазоне давлений P = 0–5×10^8 Па и температур T = 273–300 К. Определена энергия ионизации уровней Mn и Zn и их барические коэффициенты, которые составили $E_{Mn} = E_c$–0.52 эВ, α_{Mn} = 1.81×10^{-11} эВ/Па, $E_{Zn} = E_c$–0.54 эВ, α_{Zn} = 1.4×10^{-11} эВ/Па соответственно.

Dynamic strain conductivity and physical mechanisms of its manifestation under impulse pressure effects in samples Si<Mn> and Si<Zn> are studied in accordance with the degree of their compensation and the type of conductivity in the range of pressures P = 0–5×10^8 Pa and temperatures T = 273–300 K. The ionization energy of the Mn and Zn levels and their baric coefficients were determined as $E_{Mn} = E_c$–0.52 eV, α_{Mn} = 1.81×10^{-11} eV/Pa, $E_{Zn} = E_c$–0.54 eV, α_{Zn} = 1.4×10^{-11} eV/Pa, respectively.

В работе исследованы динамическая тензопроводимость и физические механизмы её проявления при импульсных воздействиях давления в образцах Si<Mn> и Si<Zn> в зависимости от степени их компенсации и типа проводимости в диапазоне давлений P = 0–5×10^8 Па и температур T = 273–300 К. Определена энергия ионизации уровней Mn и Zn и их барические коэффициенты, которые составили $E_{Mn} = E_c$–0.52 эВ, α_{Mn} = 1.81×10^{-11} эВ/Па, $E_{Zn} = E_c$–0.54 эВ, α_{Zn} = 1.4×10^{-11} эВ/Па соответственно.

Спектр энергетических уровней, концентрация электроактивных атомов марганца и цинка в кремнии зависят от степени компенсации, концентрации исходных мелких примесей, а также от условий диффузионного отжига. Исследования, проведенные нами и рядом авторов [1, 2], электрических свойств кремния, компенсированного марганцем и цинком, показали, что введение марганца в *p*-Si и цинка в *n*-Si приводит к увеличению сопротивления материала и даже к изменению типа проводимости. Эти результаты свидетельствуют о донорной природе марганца и акцепторной природе цинка в кремнии. При этом, подбирая условия легирования и исходные материалы, можно получать

компенсированные образцы Si *p*- и *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho \approx 10^2$–10^5 Ом·см.

Исследования кремния *p*-типа, легированного марганцем, проведённые с помощью нестационарной ёмкостной спектроскопии (DLTS), показали, что в нижней и верхней половине запрещённой зоны быстро охлаждённого *p*-Si<Mn> наблюдаются глубокие уровни (ГУ) марганца с энергиями ионизации E_v+0.17 эВ, E_v+0.22 эВ, E_v+0.33 эВ, E_v+0.44 эВ, E_c–0.5 эВ [3]. С помощью измерений термостимулированной ёмкости были обнаружены два ГУ в *p*-Si<Mn>: E_c–0.55 эВ и E_v+0.27 эВ, которые связаны с комплексом ($Mn^{++}B^-$) и двухратно ионизованным состоянием Mn^{++}. Согласно исследованиям спектров ЭПР в перекомпенсированных образцах *n*-Si<Mn> наблюдаются уровни с энергиями ионизации E_c–0.3 эВ, E_c–0.5 эВ, которые связаны соответственно с междоузельными атомами марганца Mn^0 и присутствием в кристалле примесных кластеров Mn_4 [4]. По исследованиям температурной зависимости коэффициента Холла [1], электрических измерений и оптического поглощения [5, 6] было установлено, что цинк вносит в запрещённую зону кремния акцепторные уровни E_v+0.28 эВ и E_c–0.55 эВ, связанные с центрами замещения, и донорный уровень E_v+0.43 эВ, связанный с междоузельными атомами цинка.

Для исследования тензоэффекта при импульсных режимах воздействия всестороннего давления нами были использованы контрольные Si<B> и сильно компенсированные образцы Si<Mn> и Si<Zn> *n*- и *p*-типа проводимости с одинаковыми геометрическими размерами 2×3×6 мм^3 в виде прямоугольных параллелепипедов, эксперименты проводили согласно методу [7].

На рис. 1 приведены кинетические зависимости тока $J(t)$ от времени, состоящие из двух участков, соответствующих по времени приложению и снятию давления в образцах *n*-Si<Mn> с удельным сопротивлением $\rho = 1.6\times 10^5$ Ом·см при воздействии импульсного давления трапециодальной формы с амплитудой $\Delta P = 5\times10^8$ Па и скважностью ~60 с при температуре окружающей среды 293°C. Из рис. 1 видно, что при импульсном воздействии давления $P(t)$ значение тока в образцах начинает резко возрастать и при достижении давлением своего амплитудного значения величина тока также принимает некоторое свое максимальное значение J_{max}. Далее с течением времени величина тока в образцах, релаксируя экспоненциально, уменьшается до своего статического значения $J_{ст}$ (участок I). При этом давление в образцах, как это показано на рис. 1, выдерживается

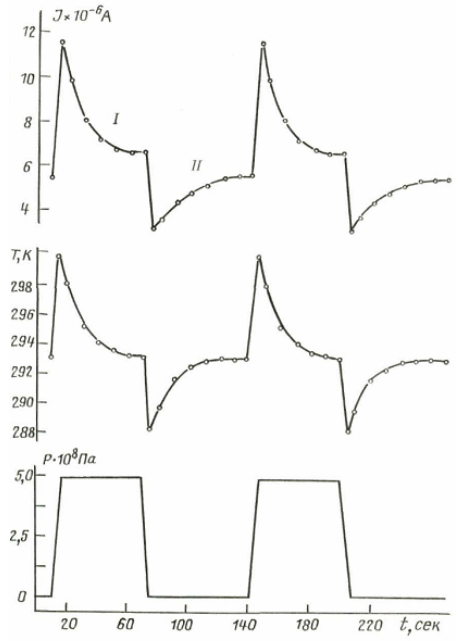


Рис. 1. Кинетические зависимости тока и температуры в образцах *n*-Si<Mn> при импульсном воздействии ВГС.

постоянным. После резкого снятия давления значение тока в образцах также резко уменьшается до значения некоторого своего минимума J_{min}, а далее релаксируя восстанавливает своё исходное, до приложения давления, значение J_0 (участок II). При повторной импульсной нагрузке с той же амплитудой и скоростью изменения в поведении тензопроводимости наблюдается аналогичная картина, которая в качественном и количественном отношении полностью воспроизводится.

Анализ полученных экспериментальных результатов при импульсных воздействиях ВГС показал, что наблюдаемые динамические изменения тока в образцах связаны с синхронными изменениями их температуры (рис. 1, кривая 2), т.е. в процессе импульсного сжатия образцы нагреваются, их температура начинает возрастать, и при достижении максимального давления температура также приобретает максимальное значение T_{max} (участок I). Далее с течением времени образцы вследствие рассеяния тепловой энергии кристалла в окружающую среду начинают охлаждаться, и температура релаксирует до своего первоначального значения T_0. При резком снятии давления образцы, наоборот, начинают охлаждаться, температура понижается до некоторого значения T_{min}, далее релаксируя приобретает своё первоначальное значение T_0 (участок П). Значения тока и температуры в образцах зависят от скорости и амплитуды импульсного давления, а также от условий теплоотвода.

Для выявления физических механизмов проявления динамической проводимости при импульсных режимах воздействия всестороннего гидростатического сжатия нами был исследован тензо-Холл эффект в исследованных образцах Si<Mn> и Si<Zn> с различными степенями компенсации. Измерения коэффициента Холла проводили при импульсных и статических режимах воздействия давления. Измерения при импульсных режимах воздействия давления показали, что изменение тока в образцах обусловлено, в основном, изменением концентрации носителей тока. На рис. 2 приведены кинетические зависимости концентрации носителей тока в образцах *n*-Si<Mn> (кривая 1) и *n*-Si<Zn> (кривая 2) с удельными сопротивлениями соответственно $\rho = 1.62\times 10^5$ Ом·см и $\rho = 4.35\times10^4$ Ом·см. Из рисунка видно, что изменение концентрации носителей тока происходит синхронно с изменением температуры и отражает картину изменения тока в образцах. При этом изменение подвижности носителей незначительно и составляет всего 2–3%.

Следовательно, динамическое изменение тока в компенсированных образцах Si<Mn> и Si<Zn> при импульсных режимах воздействия ВГС можно представить в виде [8]:

$$J = e\mu nU\frac{S}{l}.$$

Учитывая, что $n = n_0\exp\left[-\left(E_i - \alpha_i P/kT\right)\right]$,

$$J = e\mu nU\frac{S}{l} = e\mu n_0 U\frac{S}{l}\exp\left[-\left(E_i - \alpha_i P/kT\right)\right], \quad (1)$$

где U – напряжение, приложенное к образцу, S и l – поперечное сечение и длина образца, e, μ, n – величины заряда, подвижности и концентрации носителей тока, E_i и α_i – энергия ионизации глубоких уровней и барические коэффициенты их изменений при ВГС, P – значение приложенного давления, T – температура образца, k – постоянная Больцмана.

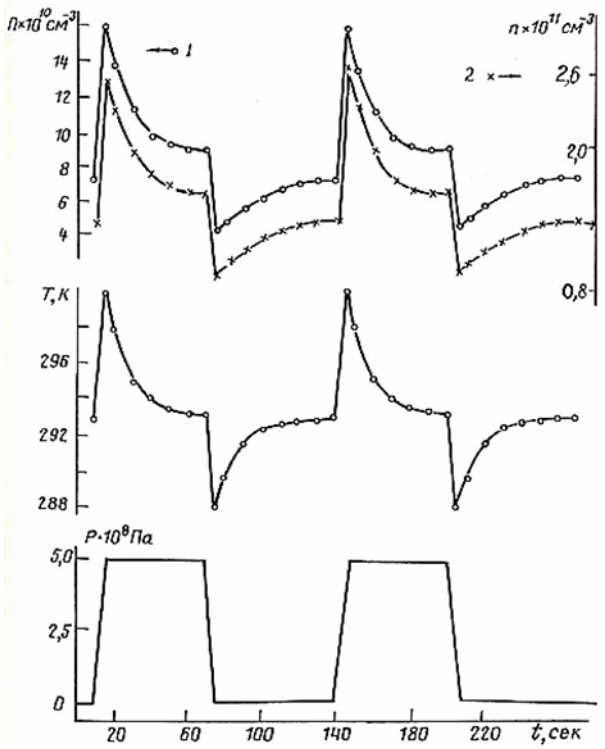


Рис. 2. Кинетические зависимости концентрации электронов в образцах Si<Mn> и Si<Zn> при импульсном воздействии ВГС: *1* – *n*-Si<Mn>, ρ = 1.6×10^5 Ом·см; *2* – *n*-Si<Zn>, ρ = 4.35×10^4 Ом·см.

Логарифмируя и далее дифференцируя по температуре выражение (1), получаем:

$$\frac{\partial \ln J}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T}\left[\ln\left(e\mu n_0 U\frac{S}{l}\right)\right] - \frac{1}{k}\left(E_i - \alpha_i P\right)\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{1}{T}\right). \qquad (2)$$

Учитывая малость интервала изменений температуры ($\Delta T \sim 10$ К), изменением подвижности носителей тока можно пренебречь, и считая, что

$$\frac{\partial}{\partial T}\left[\ln\left(e\mu n_0 U\frac{S}{l}\right)\right] = 0,$$

для энергии ионизации примесных уровней E_i имеем:

$$E_i = \alpha_i P - k\frac{\partial}{\partial T}\ln J \Big/ \frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{1}{T}\right). \qquad (3)$$

Энергия ионизации уровней Mn и Zn и их барические коэффициенты, определённые согласно выражению (3), составили $E_{Mn}=E_c-0.52$ эВ и $\alpha_{Mn}=1.81\times10^{-11}$ эВ/Па, $E_{Zn}=E_c-0.54$ эВ и $\alpha_{Zn}=1.4\times10^{-11}$ эВ/Па, которые хорошо согласуются с данными работ [5, 6].

Таким образом, проведённые исследования динамической проводимости при импульсных режимах воздействия давления в компенсированных и сильно компенсированных образцах Si<Mn> и Si<Zn> показали, что динамическая

тензопроводимость, обусловленная термоэффектом, стимулированным давлением, намного превосходит их статическую тензочувствительность и представляет интерес с точки зрения создания чувствительных датчиков внешнего давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. М.К. Бахадырханов, Б.И. Болтакс, Г.С. Куликов, Э.М. Педяш, ФТП **4**, №5, 873 (1970).
2. М.К. Бахадырханов, С. Зайнабидинов, Т.С. Комилов, А.Т. Тешабоев, ФТП **8**, №12, 2263 (1974).
3. К.П. Абдурахманов, Х.С. Далиев, А.А. Лебедев, Ш.Б. Утамуродова. В сборнике научных трудов ТашГУ, 84-87 (1985).
4. Ш.И. Аскаров. Автореферат. канд. дисс. (Ленинград, 1982).
5. А. Абдураимов. Автореферат. канд. дисс. (Кишинев, 1990).
6. А. Абдураимов, С.З. Зайнабидинов, О.О. Маматкаримов, И.Г. Турсунов, О. Химматкулов, ФТП **27**, №3, 516 (1993).
7. А. Абдураимов, С.З. Зайнабидинов, О.О. Маматкаримов, О. Химматкулов, Т.Э. Худайбергенов, ПТЭ № 5, 229 (1988).
8. А.А. Полякова. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов (Москва, Энергия, 1979).