

## ЛИТЕРАТУРА

1. Seyidov M.H. [et al.] Identification of Intrinsic Deep Level Defects Responsible for Electret Behavior in TlGaSe<sub>2</sub> Layered Semiconductor. // Physica B, 2016. V. 483. P. 82.
2. Одринский А.П. Анализ релаксации фототока полуизолирующего GaAs в области температур 150–200 К. // ФТП. 2015. Т. 49, С. 294.
3. Белинчер В.И., Стурман Б.И. Фотогальванический эффект в средах без центра симметрии. // УФН. 1980. Т. 130. С. 415.
4. Qasrawi A.F., Gasanly N.M. Electrical conductivity and Hall mobility in p-type TlGaSe<sub>2</sub> crystals. // Material Research Bulletin. 2004. V. 39. P. 1353.

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ Ge+Sn ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

С. Л. Прокопьев, И. А. Сульжич, А. Г. Новиков, П. И. Гайдук

*Белорусский государственный университет, prokopyev@bsu.by*

Холловскими методами измерений исследовались структуры  $p^+Ge/Ge_{99}Sn_{01}/n^+Si$  на подложках Si/SiO<sub>2</sub> после обработки в водородной плазме. Проведены измерения подвижности и концентрации носителей заряда в указанных структурах в зависимости от режимов термообработки, а также на различной глубине структур при полойном сравнении.

### ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что полупроводниковые материалы после обработки в водородной плазме приобретают новые полезные электрофизические свойства [1]. В [2–3] на примере слоев Ge+Sn продемонстрирована возможность повышения концентрации и подвижности носителей заряда вплоть до величин, характерных для монокристаллического кремния. Мы полагаем, что модифицированные водородом слои Ge+Sn могут быть перспективны, например, для создания новых типов фотодетекторов и солнечных элементов на основе как моно- так и поликристаллических слоев. В данной работе исследовались электрофизические свойства структур со слоями Ge+Sn с низким содержанием олова, подвергнутые водородной и термической обработке.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для выполнения исследований на подложке Si/SiO<sub>2</sub> на установке молекулярно-лучевой эпитаксии формировалась структура  $p^+Ge/Ge_{99}Sn_{01}/n^+Si$ . Сначала выращивался слой Ge р-типа (100 нм), затем – слой Ge<sub>99</sub>Sn<sub>01</sub> (500 нм). Верхним слоем являлся  $n^+Si$  (100 нм). Предварительно все образцы, подготовленные к дальнейшим исследованиям, отжигались при температуре 450 °С или 500 °С в течение 15–30 минут на воздухе или в азоте. Химическое травление для очистки поверхности структуры и исследования ее свойств по глубине проводилось, соответственно, в водном растворе (HF 5%) и смеси концентрированных кислот (HF:HNO<sub>3</sub> = 1:15).

Водородная обработка структур проводилась при температуре 250 °С в плазме тлеющего разряда. Параметры разряда равнялись: напряжение разряда  $U_p=500$  В, ток разряда  $I_p=1$  мА, плотность тока  $J_p=80$  мкА/см<sup>2</sup>. Длительность обработки – 25 мин.

Термообработка структур проводилась в печи типа СУОЛ при температурах 550–650 °С в течение 15 мин в азоте.

Подвижность носителей и концентрацию электрически активной примеси получали холловскими методами измерений на структурах Ван дер Пау. Измерения проводились при индукции магнитного поля  $B = 1,09 \pm 0,02$  л.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, 2 показаны зависимости слоевой подвижности носителей заряда  $\mu_s$  от температуры отжига  $T_{отж}$  и от времени травления  $t$  в растворе HF + HNO<sub>3</sub>(1:15) после водородной обработки.

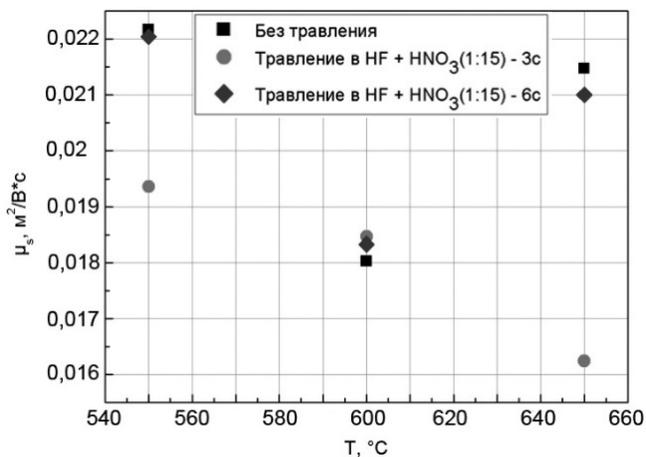


Рисунок 1. – Зависимость подвижности носителей заряда от температуры отжига после водородной обработки

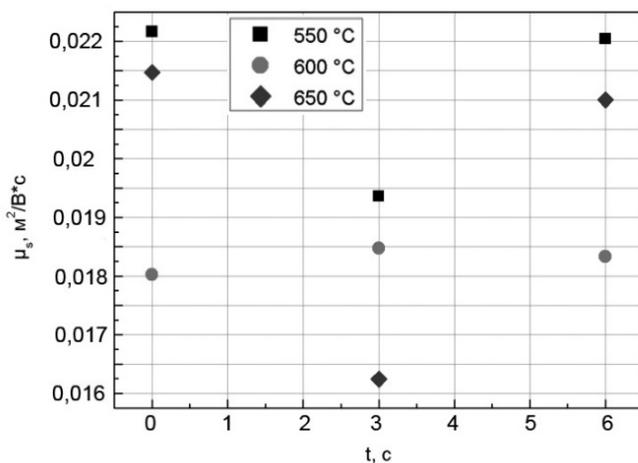


Рисунок 2. – Зависимость подвижности носителей заряда от времени травления в растворе HF + HNO<sub>3</sub>(1:15) после водородной обработки

В структурах, которые не подвергались химическому травлению (исходные структуры),  $\mu_s = 0,022 \text{ м}^2/\text{Вс}$  ( $T_{\text{отж.}} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $0,018 \text{ м}^2/\text{Вс}$  ( $T_{\text{отж.}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и  $0,021 \text{ м}^2/\text{Вс}$  ( $T_{\text{отж.}} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ) (рис. 1). После травления структур в течение 3 с,  $\mu_s = 0,019 \text{ м}^2/\text{Вс}$  ( $T_{\text{отж.}} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $0,018 \text{ м}^2/\text{Вс}$  ( $T_{\text{отж.}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $0,016 \text{ м}^2/\text{Вс}$  ( $T_{\text{отж.}} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ). После травления структуры в течение 6 с следует отметить  $\mu_s = 0,021 \text{ м}^2/\text{Вс}$  ( $T_{\text{отж.}} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Величина  $\mu_s$  при  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  практически не отличается от таковой для исходной структуры. На зависимости  $\mu_s(t)$  (рис. 2) видно, что минимальная величина  $\mu_s = 0,016\text{--}0,0195 \text{ м}^2/\text{Вс}$  наблюдается после травления структуры в течение 3 с.

На рис. 3, 4 показаны зависимости слоевой концентрации носителей заряда  $N_s$  от температуры отжига и от времени травления в растворе  $\text{HF}+\text{HNO}_3(1:15)$  после водородной обработки.

Из рис. 3 следует, что в исходной структуре  $N_s = 9,5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$  ( $T_{\text{отж.}} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $14 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$  ( $T_{\text{отж.}} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и  $7 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$  ( $T_{\text{отж.}} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Следует отметить величину  $N_s$  после травления структуры в течение 3 с, равную  $9 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$ . Из рис. 4 следует, что при любой длительности травления структуры по глубине максимальное значение  $N_s$  получено для структур после термообработки при  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В свою очередь, величина объемной концентрации носителей заряда  $N_v$  монотонно растет с ростом времени травления в диапазоне температур  $550\text{--}650 \text{ }^\circ\text{C}$  (для каждой температуры отжига) от  $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (в исходной структуре,  $T_{\text{отж.}} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ) до  $5 \cdot 10^{18}$  (в структуре после травления в течение 6 с и  $T_{\text{отж.}} = 600 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Проведено сравнение результатов измерений  $\mu_s$ ,  $N_s$  и  $N_v$  в структурах после водородной обработки с  $\mu_s$ ,  $N_s$  для серии структур без водородной обработки. Из сравнения следует, что  $\mu_s$  в структурах после водородной обработки увеличивается в среднем в 1,25 раза. С другой стороны, величина  $N_s$  в структурах после водородной обработки уменьшается в среднем в 1,8 раза.

Таким образом, обнаружен сложный характер зависимости электрофизических параметров от времени травления и температуры отжига.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована возможность изменения электрофизических свойств поликристаллических слоев  $\text{Ge}+\text{Sn}$  путем обработки в водородной плазме. Водородная обработка при напряжении разряда  $U_p=500 \text{ В}$ , токе разряда  $I_p=1 \text{ мА}$  и плотности тока  $J_p=80 \text{ мкА/см}^2$  в течение 25 мин при  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , а также термообработка при  $550\text{--}650 \text{ }^\circ\text{C}$  приводили к увеличению  $\mu_s$  в среднем в 1,25 раз, и уменьшению  $N_s$  в среднем в 1,8 раз по сравнению со структурой после выращивания.

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ (договор Т16Р-167) и ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (задание 3.2.03.1).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hydrogen in Semiconductors. Ed. By J. I. Pankove, N.M. Johnson. – San Diego: Academic Press, Inc, 1991. – 631 p.
2. N. Uchida, et al. Carrier and heat transport properties of polycrystalline GeSn films on  $\text{SiO}_2$  // Appl. Phys. Lett. –2015. – 107. – P. 232105.
3. W. Takeuchi, et al. High hole mobility tin-doped polycrystalline germanium layers formed on insulating substrates by low-temperature solid-phase crystallization // Appl. Phys. Lett – 2015. – 107. – P. 022103.