

Инверсия типа проводимости эпитаксиальных пленок твердых растворов PbSnTe при воздействии лазерного излучения допороговой мощности

© Ю.Б. Греков, Н.А. Семиколонова*, Т.А. Шляхов

Омский государственный университет,
644077 Омск, Россия

* Институт сенсорной микроэлектроники Сибирского отделения Российской академии наук,
644077 Омск, Россия

(Получена 14 января 1997 г. Принята к печати 4 февраля 1997 г.)

Исследованы процессы инверсии типа проводимости в эпитаксиальных пленках $Pb_{1-x}Sn_xTe$ при воздействии непрерывного излучения CO_2 -лазера ($\lambda = 10.6$ мкм) допороговой мощности. Предполагается, что стабильное инверсионное состояние возникает вследствие образования нейтральных бивакансий металла и халькогена.

Введение

Для создания активных элементов оптических интегральных схем на базе полупроводниковых твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$ необходимо изменять концентрацию носителей заряда в эпитаксиальных структурах в широких пределах от 10^{15} см^{-3} для фотодетекторов до 10^{18} см^{-3} для оптических квантовых генераторов.

Известно, что в монокристаллах $PbSnTe$ n -типа проводимости воздействие лазерного излучения с длинами волн 0.694 и 1.0 мкм (энергия фотона больше ширины запрещенной зоны, $\hbar\omega > E_g$) при плотности энергии выше порога рекристаллизации приводит к инверсии типа проводимости, а в монокристаллах p -типа проводимости концентрация дырок увеличивается более чем на порядок [1–2].

В настоящей работе воздействию лазерного излучения подвергались эпитаксиальные пленки p - $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$, полученные методом "горячей стенки" на подложке BaF_2 с ориентацией $\langle 111 \rangle$. Источник состава $(Pb_{0.8}Sn_{0.2})_{1.01}Te_{0.99}$ синтезирован из Pb (99.9999), Sn (99.9999) и Te (Т-В4). Перед началом эпитаксии объем с реакционной камерой откачивался до давления $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ Тор. Температура подложки составляла 240°C . Источник нагревался до 550°C , стенка имела температуру на десять градусов выше. Дополнительный источник теллура был введен для изменения концентрации дырок в образцах [3]. Исследуемые эпитаксиальные слои представляли собой квадраты со стороной 5 мкм, толщина пленок $10 \div 40$ мкм. Лазерный отжиг эпитаксиальных пленок осуществлялся в вакуумированной камере. Для облучения использовался CO_2 -лазер, работающий в непрерывном режиме, длина волны излучения $\lambda = 10.6$ мкм. Плотность мощности излучения меньше порога рекристаллизации. Во всех случаях ширина запрещенной зоны облучаемых пленок $E_g = (0.21 \div 0.22)$ эВ удовлетворяла условию $E_g > \hbar\omega$.

Результаты эксперимента

На рис. 1 приведены зависимости коэффициента Холла R от температуры в интервале $T = 77 \div 400$ К для серии образцов с различной концентрацией дырок. Зависимость холловской подвижности μ от концентрации дырок при 300 К дана на рис. 2. Функциональные зависимости $R(T)$ и $\mu(T)$ для всех исследованных образцов соответствуют известным экспериментальным данным. На рис. 3 приведены температурные зависимости коэффициента Холла для пленки с наибольшей концентрацией дырок ($p = 7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) после воздействия лазерного излучения различной плотности мощности. С возрастанием плотности мощности излучения концентрация дырок уменьшается (кривые 1–4), при мощности $P_{inv} \approx 30 \text{ Вт/см}^2$ наблюдается инверсия типа проводимости (рис. 3, кривая 5). Инверсионное состояние

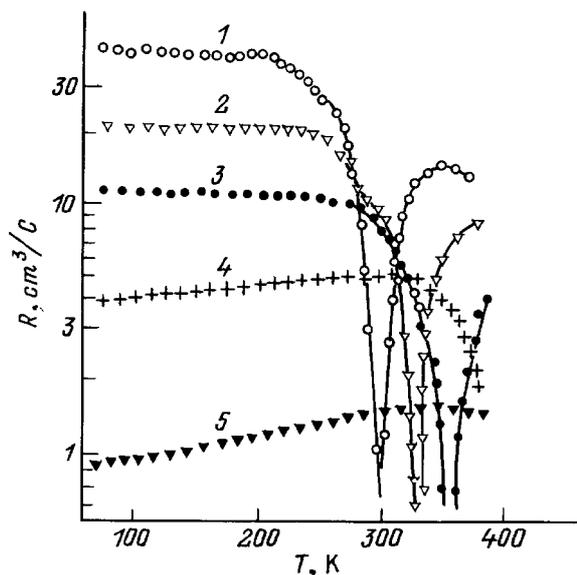


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициента Холла R эпитаксиальных пленок $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ с концентрацией дырок p , 10^{17} см^{-3} : 1 — 1.3, 2 — 2.9, 3 — 5.8, 4 — 14, 5 — 70.

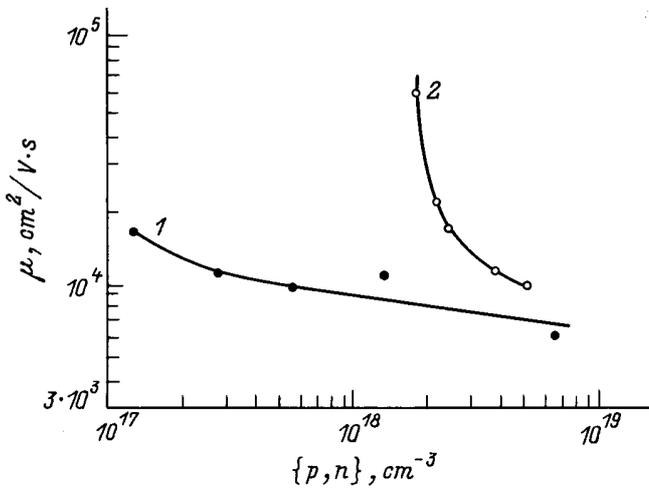


Рис. 2. Зависимость подвижности μ носителей заряда от концентрации дырок p до облучения (1) и электронов n после облучения (2).

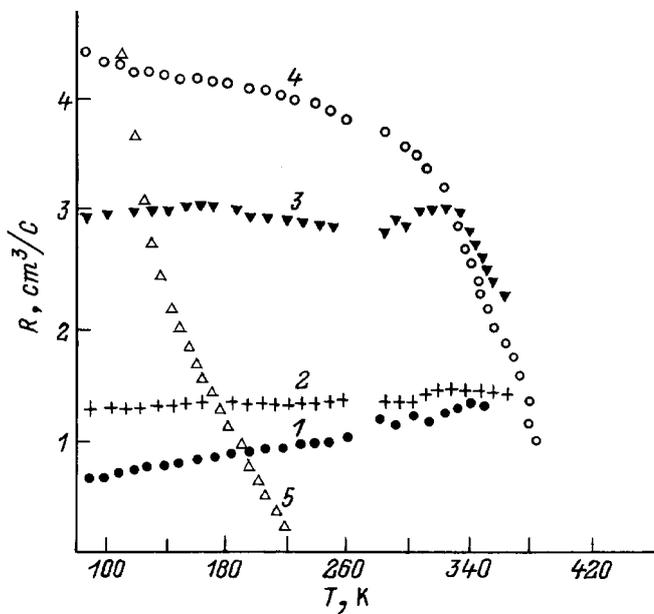


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента Холла эпитаксиальной пленки $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ с концентрацией дырок $p = 7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. 1-5 соответствуют последовательно возрастающим плотностям мощности излучения.

является стабильным до комнатных температур. Изменение коэффициента Холла этого образца при изменении плотности мощности излучения при температурах 297 и 77 К показано на рис. 4.

При мощности излучения $P < P_{inv}$ также возникают инверсные состояния, но они неустойчивы. Релаксационные процессы возвращают образец в состояние с дырочной проводимостью через 240÷260 ч, что наблюдается как при комнатных, так и при азотных температурах. Дополнительное облучение позволяет получить стабильные инверсные состояния.

Обсуждение результатов

Как отмечалось в работе [4], кристаллы твердых растворов $Pb_{1-x}Sn_xTe$, полученные из стехиометрических расплавов, характеризуются значительными концентрациями дефектов — вакансий металла и вакансий халькогена, которые являются электрически активными. Кроме того, вследствие концентрационного переохлаждения кристаллы $Pb_{1-x}Sn_xTe$ характеризуются наличием областей, обогащенных металлом и теллуром вне зависимости от содержания компонент в расплаве [5,6]. По-видимому, при определенных условиях выращивания области, обогащенные металлом и теллуром, могут существовать и в эпитаксиальных пленках, выращенных методом горячей стенки. Диффузия атомов металла из таких областей может приводить к изменению типа проводимости с дырочного на электронный, так как атомы металла, заполняя вакансии в металлической подрешетке, ликвидируют при этом по две дырки от каждой вакансии. В то же время, находясь в междоузлии, ионы металла являются однократно заряженными донорами [7]. Такой процесс имеет место при терми-

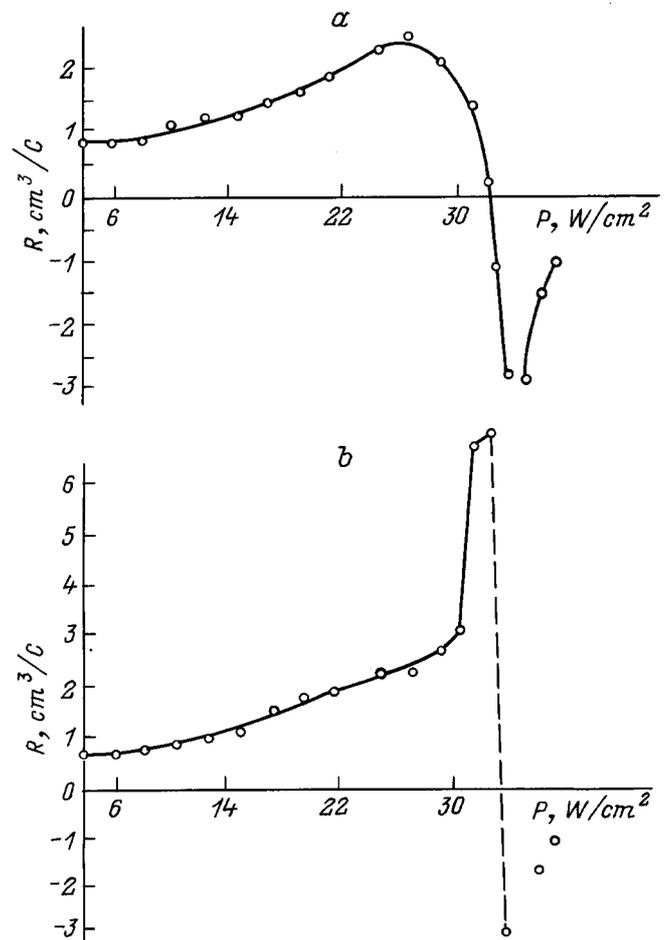


Рис. 4. Зависимость коэффициента Холла эпитаксиальной пленки $Pb_{0.8}Sn_{0.2}Te$ с концентрацией дырок $p = 7 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ от плотности мощности излучения при 297 (а) и 77 К (б).

ческом отжиге кристаллов PbTe p -типа проводимости в нейтральной атмосфере при $T = 400^\circ\text{C}$, при котором получена инверсия типа проводимости без использования легирующих примесей и избытка паров металлических компонентов [6].

Как показано в работе [8], эффект от воздействия лазерным излучением при условии $\hbar\omega < E_g$ не связан с термическим отжигом, а обусловлен многофотонным возбуждением межузельных атомов в сильном электромагнитном поле CO₂-лазера в областях искажения решетки скоплениями атомов и последующей их диффузией из таких областей. Распад микрообластей, обогащенных металлическими компонентами, приводит к изменению типа проводимости образца, при этом возрастает подвижность носителей (рис. 2). В то же время наличие зависимости инверсии типа проводимости от мощности излучения свидетельствует о том, что имеет место совместное действие теплового эффекта и многофотонного возбуждения. При определенном значении мощности достигается температура, которая в сочетании с многофотонным возбуждением приводит к инверсии типа проводимости.

В этом случае инверсионное состояние неустойчиво и сопровождается релаксационным процессом, который возвращает образец к дырочному типу проводимости. Концентрация электронов в течение нескольких суток уменьшается, затем после реинверсии типа проводимости возвращается к значению, близкому к исходному. Релаксационные процессы могут быть связаны с возвращением в подрешетку халькогена атомов Te, которые оказались в междоузлии в результате многофотонного возбуждения. При последующих облучениях часть атомов Te выходит из образца в вакуум и электронный тип проводимости становится стабильным.

На возможность многофотонного возбуждения атомов указывают метастабильные состояния, которые возникают при различных плотностях мощности облучения. Возможно, что стабильное инверсное состояние связано с образованием нейтральных бивакансий и халькогена, которые разрушаются при температурах выше комнатной [7,9].

Список литературы

- [1] К.Д. Товстюк, Г.В. Пляцко, В.Б. Орлецкий и др. УФЖ, **21**, 531 (1976).
- [2] Е.А. Горин, И.А. Бережная, Д.А. Генералова, С.Н. Емелин, Г.И. Янко. ФТП, **16**, 1687 (1982).
- [3] О.М. Савенко, Ю.Б. Греков, А.С. Семиколонов. *II Всес. конф. по физико-химическим основам технологии сегнетоэлектрических и родственных материалов* (Звенигород, 1993) с. 190.
- [4] В.И. Кайданов, Ю.И. Равич. УФН, **145**, 58 (1985).
- [5] Т.Т. Дедегкаев, В.А. Мошников, Д.Б. Чеснокова, Д.А. Яськов. Письма ЖТФ, **6**, 1030 (1980).
- [6] R. Breshi, A. Camansi, V. Fano. *J. Cryst. Growth*, **5**, 399 (1982).
- [7] H. Heinrich. *Lect. Not. Phys.*, **133**, 407 (1979).

- [8] С.В. Пляцко, Ю.С. Громовой, Ф.Ф. Сизов. *Квант. электрон.* (Киев, Наук. думка) вып. 29, 93 (1985).
- [9] Ш.Ш. Башкиров, А.Б. Либерман, С.С. Царевский, Р.А. Насыбуллин. ФТП, **30**, 281 (1988).

Редактор Л.В. Шаронова

Inversion of conductivity type of PbSnTe solid solution epitaxial films under laser radiation with power below the recrystallization threshold

Yu.B. Grekov, N.A. Semikolenova*, A.T. Shljakhov

Omsk State University,
644077 Omsk, Russia

* Institute of Sensore Microelectronics Siberian,
Branch of Russian Academy of Sciences,
R-644077 Omsk, Russia

Abstract The conductivity type inversion processes in Pb_{1-x}Sn_xTe epitaxial films under continuous CO₂ laser radiation with power density below the recrystallization threshold were investigated. It is supposed that the stable inversion state owes its existence to the formation of neutral bivacancies of metal and chalcogen.

Fax: (007)(3812)64-86-76

E-mail: Semikole@univer.omsk.su (Semikolenova)