

ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА И ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ГЕРМАНИЯ

Г.Д. Ивлев¹⁾, С.Л. Прокопьев¹⁾, Е.И. Гацкевич²⁾, И.А. Файзрахманов³⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, ivlev-1947@mail.ru

²⁾Белорусский национальный технический университет,

пр. Независимости 65, 220013 Минск, Беларусь, gatskevich_elena@bk.ru

³⁾Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского КазНЦ РАН,

Сибирский тракт 10/7, 420029 Казань, Россия, fiak@kfti.knc.ru

Проводилась кристаллизация тонкопленочного германия с примесью сурьмы под действием наносекундного излучения рубинового лазера. Исследована лазерно-индуцированная проводимость (ЛП) исходной пленки a-Ge:Sb, осажденной на сапфировую подложку методом ионно-лучевого распыления составной мишени, и поликристаллических слоев n⁺-Ge:Sb, сформированных лазерной обработкой a-Ge:Sb. Установлены зависимости отклика ЛП от плотности энергии возбуждающего излучения и от энергетического режима лазерной обработки.

Введение

Импульсная лазерная обработка (ИЛО) является эффективным методом модификации различных материалов [1] и исследования их поведения в условиях существенного отклонения от термодинамического равновесия, свойственных импульсному воздействию высокоэнергетических потоков наносекундного лазерного излучения.

Изучение эффектов наносекундной ИЛО тонкопленочного германия [2-4] вызывает интерес как с научной, так и с практической точек зрения в плане применения метода ИЛО для формирования напряженных и сильно легированных слоев этого полупроводника в технологии микро- и оптоэлектронных приборных структур. Показано [4], что ИЛО тонких пленок аморфного германия с содержанием примеси сурьмы до 1 ат.% (a-Ge:Sb) позволяет формировать поликристаллические слои n⁺-Ge:Sb (pc-Ge:Sb) на кварце, характеризующиеся весьма высокой концентрацией электронов проводимости $\sim 5.5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Цель данной работы заключается в формировании слоев pc-Ge:Sb (n⁺-Ge:Sb) на сапфире (Al₂O₃) в ряде энергетических режимов ИЛО гетеросистемы a-Ge:Sb/Al₂O₃ и исследовании нестационарной проводимости тонких пленок a-Ge:Sb и pc-Ge:Sb, возбуждаемой нанопульсным лазерным излучением.

Основная часть

Образец a-Ge:Sb/Al₂O₃ был приготовлен методом ионно-лучевого распыления составной мишени, представляющей собой пластину диаметром 60 мм из высокоомного монокристалла p-Ge с прикрепленными на ней таблетками Sb диаметром 3 мм, количество которых подбиралось исходя из заданной (0.5 ат.%) концентрации примеси в пленке германия. Пленку толщиной 0.25 мкм формировали на полированной сапфировой подложке в вакуумной камере ($p \sim 2 \cdot 10^{-4}$ Торр) при распылении указанной мишени широкоапертурным пучком ионов Xe⁺ (энергия 1.3 кэВ) при плотности ионного тока 150 мкА/см². ИЛО слоя a-Ge:Sb/Al₂O₃ проводилась моноимпульсным излучением рубинового лазера на установке, схема

которой приведена в работе [2]. Длительность импульса составляла 75 нс по уровню 0.5, неравномерность распределения энергии по облучаемой зоне диаметром 4 мм не превышала $\pm 5\%$. Лазерно-индуцированная проводимость (ЛП) исходной пленки и зон ИЛО исследовалась при возбуждении ее значительно ослабленным излучением этого же лазера.

Для тестирования ЛП на зоны ИЛО и необлученную поверхность образца (рис. 1) были попарно нанесены тонкослойные контакты из серебряной пасты, представляющие собой параллельные полоски, разделенные миллиметровым промежутком пленки. Окружностями на фотографии обозначены некоторые из зон ИЛО. Пара контактов в верхней части пластины нанесена на исходную пленку a-Ge.

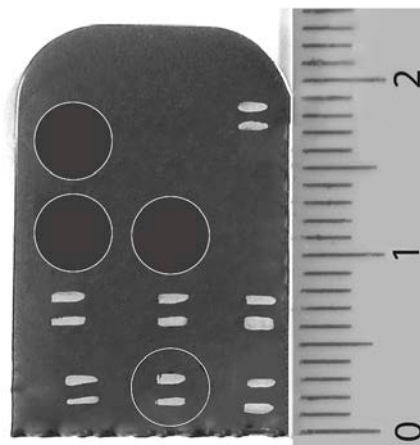


Рис. 1. Фотография образца a-Ge/Al₂O₃

Регистрировались осциллограммы сигнала ЛП, подаваемого на вход осциллографа В-424. Сигнал снимался с нагрузочного резистора $R_n = 50 \text{ Ом}$, включенного последовательно с тестируемой межконтактной областью пленки, обладающей величиной сопротивления R_{mk} . На электрической цепочке $R_n - R_{mk}$ с параллельно подключенным к ней блокировочным конденсатором емкостью 0.5 мкФ задавалось напряжение U_k . При те-

стировании ЛП исходной пленки a-Ge:Sb величина U_k составляла 50 В, а соответствующий ей ток I_{mk} в межконтактной области пленки – 0.3 мА ($R_{mk} \sim 170$ кОм). Исследование ЛП модифицированных областей пленки (зон ИЛО) проводилось при напряжении $U_k \leq 3$ В; ток I_{mk} был менее 6 мА.

Исходная пленка a-Ge:Sb и зоны ИЛО, сформированные на исследуемом образце при плотностях энергии W в лазерном импульсе от 0.25 до 1.1 Дж/см², предварительно тестировались на установке измерения спектров фотопроводимости (ФП) полупроводниковых структур, использованной ранее [5] для исследования ФП лазерномодифицированных эпитаксиальных слоев Si-Ge/Si. Однако отклик ФП не наблюдался как от исходной, так и от модифицированных пленок германия. Плотность мощности возбуждающего излучения (от лампы СИ-100), длина волны которого сканировалась монохроматором МДР-12У в спектральном интервале 0.6-1.8 мкм, была менее 10 мВт/см². В данном эксперименте минимальная при регистрации отклика ЛП плотность энергии $W_{лп}$ в возбуждающем лазерном импульсе (ЛИ), соответствующая аппаратному соотношению сигнал/шум равному единице, составляла примерно 1 мДж/см².

Представленные на рисунке 2 осциллограммы (1-3) характеризуют динамику инициируемого тока проводимости пленки a-Ge:Sb $I_{лп}(t)$ с временной привязкой к возбуждающему ЛИ. Они взяты из серии осциллограмм, полученных при тестировании одного и того же межконтактного промежутка исходной пленки (рис. 1) с последовательным повышением величины $W_{лп}$ от импульса к импульсу. В результате обработки этой серии измерений установлена зависимость пиковой величины тока $I_{лп}$ от величины $W_{лп}$ (рис. 3; 1), согласно которой по мере повышения $W_{лп}$ максимум сигнала ЛП увеличивается, следуя почти линейной зависимости (до $W_{лп} \approx 50$ мДж/см²). Динамика отклика ЛП (рис. 2; осц. 1 и 2) при этом, в основном, описывает форму ЛИ. Качественно иной (и наибольший) сигнал ЛП (рис. 2; осц. 3) наблюдается при $W_{лп} = 65$ мДж/см². Возбуждение ЛП в этой ситуации сопровождается динамическим изменением структурного/фазового состояния a-Ge:Sb вследствие значительного роста под действием ЛИ температуры тестируемой области пленки. Дальнейшее повышение $W_{лп}$ приводит к падению отклика ЛП (рис. 3; 1).

В указанном выше интервале изменения энергетического режима модификации a-Ge:Sb время существования жидкой фазы германия (l-Ge), равное времени повышенной отражательной способности зоны ИЛО [2], составляет 0.1-0.2 мкс в зависимости от W . То есть, модификация пленки есть результат лазерно-индуцированных фазовых превращений a-Ge → l-Ge → pc-Ge, приводящих к новому структурному состоянию германия. Оно характеризуется, в частности, средним размером зерен pc-Ge, который возрастает с увеличением времени кристаллизации l-Ge, т.е. с повышением W .

Максимум сигналов ЛП (рис. 1; 4 – 6) лазерномодифицированных областей пленки, различающихся по структурному состоянию pc-Ge:Sb,

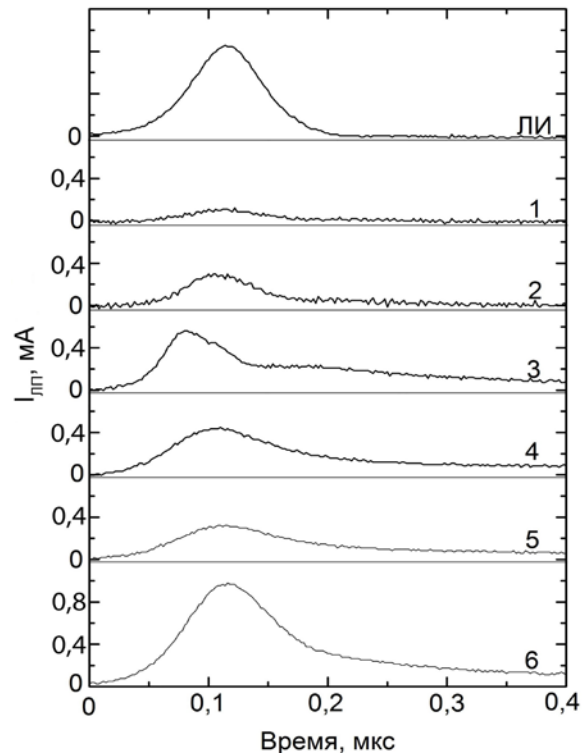


Рис. 2. Осциллограммы сигнала ЛП исходной пленки Ge:Sb (1–3), полученные при плотностях энергии $W_{лп} = 12$ (1), 20 (2) и 65 мДж/см² (3), и областей ИЛО: $W = 0.25$ Дж/см² (4; $W_{лп} = 45$ мДж/см², 0.96 (5; 45) и 1.1 Дж/см² (6; 25 мДж/см²)

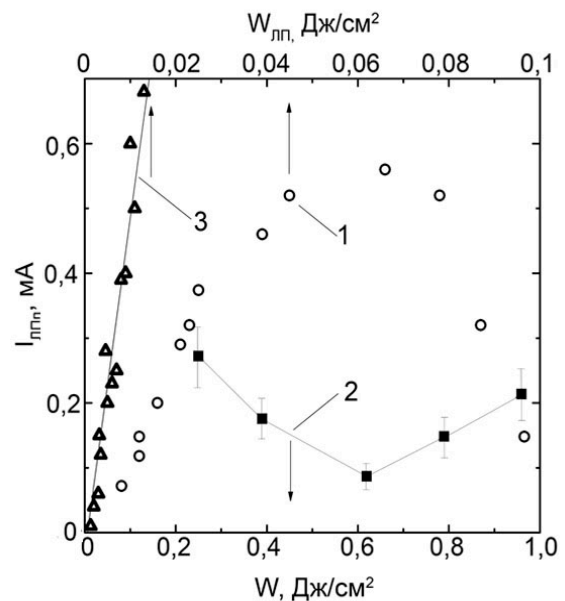


Рис. 3. Максимум ($I_{лпн}$) сигнала ЛП исходной пленки германия (1) и модифицированной при $W = 1.1$ Дж/см² (3) в зависимости от плотности энергии ЛИ $W_{лп}$ и изменение $I_{лпн}$ ($W_{лп} = 25$ мДж/см²) в зависимости от энергетического режима ИЛО a-Ge:Sb (2)

неоднозначно зависит от режима ИЛО, о чем свидетельствует установленная зависимость $I_{лпн}(W)$ (рис. 3; 2 - вертикальными отрезками обозначен разброс измеренных значений максимума сигнала $I_{лп}(t)$ относительно среднего из четырех измерений). С переходом от одной тестируемой

зоны ИЛО к другой (по мере увеличения W от 0.25 до 1.1 Дж/см²) величина $I_{\text{ЛП}}$, измеряемая при одинаковой энергии возбуждения ЛП 25 мДж/см², сначала уменьшается до минимума ~ 0.1 мА, затем возрастает. Примечателен аналогичный характер изменения слоевого сопротивления пленки Ge:Sb в зависимости от величины W , установленный в эксперименте [4] с подобными объектом исследования и условиями ИЛО. Минимальное слоевое сопротивление ~ 0.1 кОм/кв. достигалось при ИЛО пленки с плотностью энергии 0.8 Дж/см².

Наименьшим откликом ЛП в данном эксперименте характеризуется зона ИЛО, сформированная при $W = 0.6$ Дж/см², наибольшим – при энергии 1.1 Дж/см², когда в процессе ИЛО достигается эффективное плавление α -Ge:Sb со значительным нагревом жидкой фазы и происходит более длительная кристаллизация пленки, приводящая, наиболее вероятно, к образованию крупнозернистого ρ -Ge:Sb. Максимум сигнала ЛП этой зоны ИЛО согласно измеренной зависимости $I_{\text{ЛП}}(W_{\text{ЛП}})$ (рис. 3; 3) возрастает пропорционально плотности энергии возбуждающего ЛИ и при $W_{\text{ЛП}} = 25$ мДж/см² он многократно выше в сравнении с величиной $I_{\text{ЛП}}$ остальных областей ИЛО.

Исходя из того, что наблюдаемое динамическое уменьшение межконтактного сопротивления пленок $R_{\text{МК}}$ при тестировании ЛП может быть вызвано тепловым действием ЛИ, провели контрольные измерения $R_{\text{МК}}$ при повышении температуры образца (помещенного в термостат) от 20 до 50 °С. Согласно измерениям относительное изменение $\Delta R_{\text{МК}}/R_{\text{МК}}$ ($R_{\text{МК}} < 0,6$ кОм), соответствующее $\Delta T = 30$ градусов, составило для разных зон ИЛО от -8.5 % до -15 %.

В этой связи было проведено численное моделирование нагрева пленки при тестировании ЛП. Методом конечных разностей по алгоритму [6] решалось одномерное нелинейное уравнение теплопроводности, описывающее пространственно-временную эволюцию температуры в рассматриваемой системе пленка/подложка. Из расчетов, в частности, следует, что повышение ΔT температуры поверхности пленки (относительно начальной $T_0 = 295$ К) к моменту наибольшего нагрева во время действия ЛИ возрастает по мере увеличения $W_{\text{ЛП}}$ с коэффициентом пропорцио-

нальности ~ 7.5 и 4.5 К·см²·мДж⁻¹ для аморфной и кристаллической пленок Ge, соответственно. То есть, при минимальных для регистрации отклика ЛП значениях $W_{\text{ЛП}}$ возможный нагрев пленки может составлять десятки градусов. Отсюда можно заключить, что наблюдаемый эффект динамического возрастания проводимости пленок обусловлен преимущественно тепловым действием лазерного излучения.

Заключение

В результате проведенного исследования получена совокупность данных, характеризующих лазерно-индуцированную проводимость исходной пленки аморфного Ge:Sb на сапфире, осажденной методом ионно-лучевого распыления составной мишени, и поликристаллических слоев n^+ -Ge:Sb, сформированных моноимпульсной лазерной обработкой α -Ge:Sb. Установлены зависимости отклика ЛП от плотности энергии возбуждающего наносекундного излучения и от режима лазерной обработки.

Авторы выражают благодарность Н.М. Казюцицу и М.С. Русецкому за тестирование фотопроводимости исследуемого объекта.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ по проекту № Ф16Р-069 и частично РФФИ по гранту № 16-52-000-21.

Список литературы

1. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками. Под ред. Поута Дж. М., Фоти Г., Джекобсона Д.К., М.: Машиностроение. 1987. 424 с.
2. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Баязитов Р.М. и др. // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 3. С. 89-95.
3. Новиков Г.А., Баталов Р.И., Баязитов Р.М. и др. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 6. С. 746-752.
4. Batalov R.I., Bayazitov R.M. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. P. 395102 (7pp).
5. Ивлев Г.Д., Казюциц Н.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 23. С. 6-14.
6. Гацкевич Е.И., Ивлев Г.Д., Людчик О.Р. // Труды XXVI Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 4 – 9 июля 2016 г.), под. ред. проф. Бондаренко Г.Г., М.: ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2016. С. 116 – 122.

PULSED LASER PROCESSING AND LASER-INDUCED CONDUCTIVITY OF THIN FILM GERMANIUM

G. Ivlev¹), S. Prakopyeu¹), E. Gatskevich²), I. Faizrakhmanov³)

¹Belarusian State University, 4 Nezavisimosti ave., 220030 Minsk, Belarus, ivlev-1947@mail.ru

²Belarusian National Technical University,

65 Nezavisimosti ave., 220013 Minsk, Belarus, gatskevich_elena@bk.ru

³E.K. Zavoysskii Kazan Physical-Technical Institute of RAS,

10/7 Sibirsky Tract, 420029 Kazan, Russia, fiak@kfti.knc.ru

Crystallization of thin film germanium with stibium dopant was realized by nanopulsed ruby laser irradiation ($\lambda = 0,69$ μm , 75 ns FWHM) at the laser energy density from 0,25 to 1,1 J/cm². Laser-induced conductivity (LiC) of the α -Ge:Sb film formed on sapphire substrate by Xe⁺ ion-beam sputtering of a composite target and polycrystalline n^+ -Ge:Sb layers formed by the laser processing of the α -Ge:Sb film were investigated. The dependences of LiC response on the energy density of excitation radiation and on the energy regimes of the laser treatments were determined. The LiC effect is predominantly caused by the thermal effect of laser radiation.