

ЭЛЕКТРОПЕРЕНОС ПЛЕНОК АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ НА ПОЛИКОРЕ ИОННОЙ АБЛЯЦИЕЙ

А.В. Кабышев, Ф.В. Конусов, С.К. Павлов

Институт физики высоких технологий, НИ ТПУ, 634050, пр. Ленина, 30, Томск, Россия, тел. (3822) 419158, e-mail kabyshev@tpu.ru, olga.konusova@mail.ru

Исследованы энергетические характеристики и механизмы темновой и фотопроводимости пленок арсенида галлия, полученных осаждением на подложку поликристаллического корунда (поликора) из абляционной плазмы, формируемой мощным ионным пучком. Установлено влияние условий осаждения, типа мишени и отжига в вакууме при остаточном давлении $P=10^{-2}$ Па и температуре $T_{отж}=300-1200$ К на электрические и фотоэлектрические характеристики пленок. Определены вклады в температурные зависимости темновой и фотопроводимости синтезированных пленок активационной и прыжковой компонент. Тип доминирующих носителей заряда и соотношение между вкладами в проводимость активационной и прыжковой составляющих меняется при вариации условий осаждения и последующей за осаждением термообработки. Выделяется три стадии отжига $T_{отж}=300-600$, $600-800$ и $800-1200$ К с характерными особенностями изменения параметров и механизма электропереноса. При отжиге $300-600$ К изменение энергетических характеристик проводимости обусловлено перераспределением заселенности между мелкими и более глубокими локализованными состояниями дефектов, распределенными в запрещенной зоне материала пленок. Аннигиляция нестабильных собственных дефектов и комплексов на их основе влияет на изменение соотношений между параметрами проводимости, фоточувствительности и типа проводимости при отжиге $600-800$ К. Повышение устойчивости свойств пленок после термообработки и увеличение плотности состояний для прыжкового переноса при $T_{отж}=800-1200$ К обусловлено кластеризацией дефектов.

Введение

Арсенид галлия обладает рядом преимуществ по сравнению с другими полупроводниками [1, 2]. Пленки GaAs для оптоэлектроники осаждаются газофазной, жидкофазной и молекулярно-лучевой эпитаксией [1–6]. Ионная имплантация улучшает характеристики GaAs в приборах [6]. Пленки аморфного a-GaAs, также широко применяемые в приборах, осаждаются из ВЧ-плазмы [7–9], импульсным термическим осаждением [10], со-испарением элементов [11] и лазерной абляцией [12]. Осаждение пленок из абляционной плазмы, создаваемой мощным ионным пучком (МИП), позволяет решить некоторые проблемы эпитаксии, реализовать высокоскоростное осаждение с регулированием толщины пленок и формировать пленки на металлических, полупроводниковых и диэлектрических подложках [13, 14]. Электрические характеристики эпитаксиального GaAs достаточно хорошо изучены [1–6]. Установлены основные закономерности изменения его свойств после вакуумного отжига, ионного облучения, гетерогенной и химической пассивации, д-легирования поверхности, осаждения на подложки с развитой поверхностью. Характеристики электропереноса в GaAs, осажденном импульсными методами, в том числе и из абляционной плазмы, изучены в меньшей степени.

Целью работы является исследование энергетических характеристик темновой и фотопроводимости в пленках GaAs, синтезированных импульсной ионной абляцией (ИИА) на поликоре, установление доминирующего механизма электропереноса в зависимости от условий осаждения и отжига.

Результаты и их обсуждение

Пленки получены осаждением арсенида галлия из импульсной абляционной плазмы на подложки поликора [13, 14]. Пленка формировалась при последовательном воздействии на мишень GaAs до 100 импульсов тока МИП (ускоритель

ТЕМП). Отжиг проводился в вакууме при давлении $P \leq 10^{-2}$ Па и температуре $T_{отж}=300-1200$ К. Электроды наносились на поверхность пленок термическим напылением серебра. Измерения поверхностной темновой проводимости σ , фотопроводимости $\Delta\sigma_{\phi}=\sigma_{\phi}-\sigma$ (σ_{ϕ} – проводимость при освещении), фоточувствительности $K=\Delta\sigma_{\phi}/\sigma$ и ее спектральной зависимости $K(h\nu)$ ($h\nu=1.4-4.0$ эВ) выполнены на постоянном напряжении $U \leq 300$ В при температуре $T=300-700$ К. Температурные зависимости σ , $\Delta\sigma_{\phi}(T)$ аппроксимировались уравнением для активационного механизма $\sigma_a(T)=\sigma_0 \exp(-\varepsilon_{\sigma}/kT)$ (σ_0 – предэкспоненциальный множитель, ε_{σ} – энергия активации) и для прыжкового механизма переноса по локализованным состояниям (ЛС) в рамках модели Мотта $\sigma_p(T)=\sigma'_0 \exp(-T_0/T^{0.25})$ (σ'_0 – предэкспоненциальный множитель, T_0 – энергия активации). Плотность ЛС $N(E_F)$ рассчитывалась по T_0 согласно [7, 15]. Знак доминирующих носителей заряда определялся по величине фото термостимулированного тока $J_{фТСТ}(T, h\nu)$ и по полевой зависимости $K(U)$.

По зависимостям σ , $\sigma_{\phi}(T)$ выделяется три группы центров захвата с $\varepsilon_{\sigma 1}=0.1-0.3$, $\varepsilon_{\sigma 2}=0.2-0.4$ и $\varepsilon_{\sigma 3}=0.4-0.6$ эВ, которые обуславливают активационную составляющую проводимости $\sigma_a(T)$ в интервалах $\Delta T=300-400$, $300-500$ и $500-700$ К посредством обмена носителями заряда между ЛС и разрешенными зонами. В пленках, осажденных на периферии подложки, зафиксирована нестабильность свойств, повышенная фоточувствительность и разброс их параметров. По влиянию на параметры доминируют ловушки с $\varepsilon_{\sigma 3} > 0.4$ эВ. В центре осаждения устойчивость свойств к полемому возбуждению и нагреву выше. Преобладают центры захвата с $\varepsilon_{\sigma 1,2}$. Низкие величины $\varepsilon_{\sigma 1}$, σ_{01} обусловлены повышенным содержанием дефектов в пленках (по сравнению с кристаллами c-GaAs) и сильным влиянием прыжковой компоненты проводимости σ_p с участием ЛС дефектов [11, 12, 15]. Учитывая характер влияния кластеризации на

глубину локализации в запрещенной зоне (ЗЗ), более глубокие уровни с $\varepsilon_{\sigma 3}$ можно связать с точечными дефектами, а уровни $\varepsilon_{\sigma 1,2}$ с их кластерами. Кривые $\sigma(T)$ хорошо аппроксимируются суммой $\sigma(T) = a \cdot \sigma_a(T) + b \cdot \sigma_p(T)$. В большинстве пленок $a \leq b$ или $a < b$. Это более строго свидетельствует о преобладании прыжковой составляющей над активационной при $T = 300\text{--}450$ К. В пленках доминирует п-тип σ и р-тип σ_f , как показывают $J_{\text{ФТСТ}}(T, h\nu)$ и $K(U)$.

Отжиг в вакууме изменяет электронное состояние материала пленок вследствие частичной реконструкции приповерхностного слоя, изменения содержания дефектов и плотности поверхностных ЛС. Формируются кластеры As нанометрового размера [12–14]. По изменению характеристик σ и σ_f выделяется три стадии отжига $T_{\text{отж}} = 300\text{--}600$, $600\text{--}800$ и $800\text{--}1200$ К (рис. 1, 2). Между изменениями величин σ , σ_f , K и параметрами σ_a и σ_p реализуются корреляционные зависимости (рис. 3, 4).

Изменения σ , σ_f , $\varepsilon_{\sigma i}$, σ_{0i} и T_0 , σ'_0 , $N(E_F)$ при отжиге $T_{\text{отж}} = 300\text{--}600$ К обусловлены частичной релаксацией носителей заряда и их перераспределением между ЛС дефектов в пределах ЗЗ от мелких с $\varepsilon_{\sigma 1,2}$ к более глубоким уровням активации с $\varepsilon_{\sigma 3}$ и $\varepsilon > 0.7$ эВ (рис. 1, 2). Соотношение между σ_a и σ_p , плотность ЛС и тип носителей заряда почти не меняются. Аннигиляции введенных осаджением собственных дефектов и их перезарядки не зафиксировано. Это подтверждается спектрами поглощения $\alpha(h\nu)$ и $K(h\nu)$. [14].

При $T_{\text{отж}} = 600\text{--}800$ К наблюдаются максимумы ε_{σ} , σ_0 , K , смена типа проводимости п→р, рост $N(E_F)$ в зависимости от уровня электропроводности, задаваемого условиями осаджения, структурными особенностями пленок и

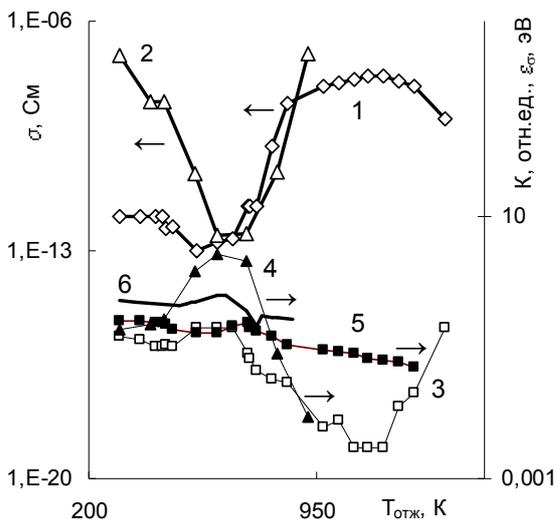


Рис. 1. Влияние отжига на электропроводность σ (1, 2), фоточувствительность K (3, 4) и энергию активации ε_{σ} (5, 6) пленок GaAs, осадженных ИИА на поликор из низкоомной (1, 3, 5, 6) и высокоомной (2, 4) мишени в центре (1–5) и на периферии осаджения (6)

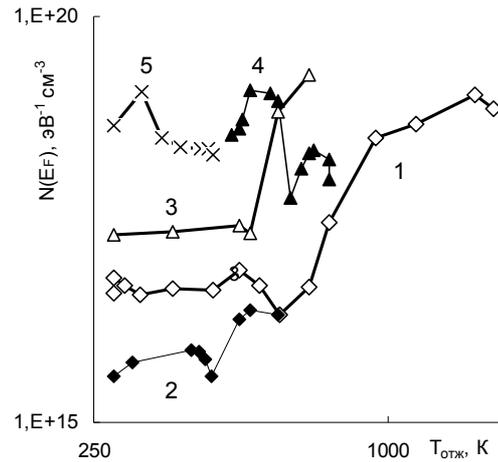


Рис. 2. Влияние отжига на плотность локализованных состояний $N(E_F)$ в пленках GaAs, осадженных ИИА на поликор из низкоомной (1, 2, 4, 5) и высокоомной (3) мишени в центре осаджения. Приведены данные для пленок, осадженных со-испарением (5) [11]

концентрацией дефектов (рис. 1, 2) [14]. Усиливается вклад в $\sigma_f(T, U)$ от дырок, возбужденных светом, в валентную зону (ВЗ). На характеристики σ , σ_f влияют процессы отжига дефектов, их перезарядки и диссоциация нестабильных комплексов дефектов [14]. Корреляция между параметрами $\varepsilon_{\sigma}(K)$ и $\sigma_0(\varepsilon_{\sigma})$ свидетельствует о доминировании активационного механизма (рис. 1, 3). ИИА пленки имеют высокую степень разупорядочения решетки дефектами, повышенную плотность ЛС на периферии осаджения, по сравнению с пленками, осадженными из ВЧ-разряда (рис. 2–4). Увеличение $N(E_F)$ при возбуждении светом обусловлено доминированием прыжкового механизма фотопроводимости.

При $T_{\text{отж}} = 800\text{--}1200$ К рост σ и σ_0 , плотности состояний до $N(E_F) = (0.6\text{--}2) \cdot 10^{19}$ $\text{эВ}^{-1} \text{см}^{-3}$, снижение K , ε_{σ} , и сближение кривых $\sigma(T_{\text{отж}})$ и $K(T_{\text{отж}})$

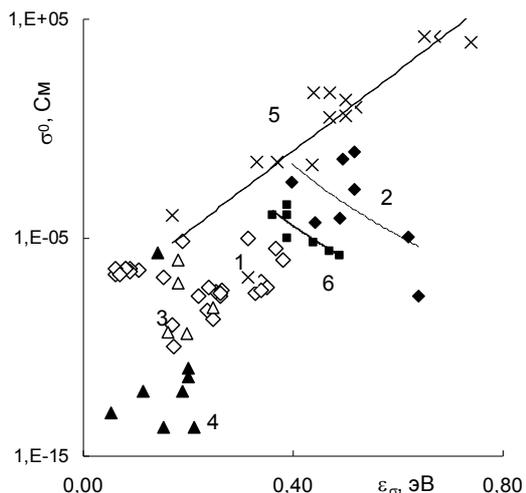


Рис. 3. Взаимосвязь $\sigma_0(\varepsilon_{\sigma})$ в пленках GaAs, осадженных ИИА на поликор с использованием низкоомной \diamond (1), \blacklozenge (2), \blacktriangle (4) и \triangle (3) высокоомной мишени. Данные для а-GaAs, осадженных из плазмы ВЧ-разряда (5) [9] и со-испарением элементов (6) [11].

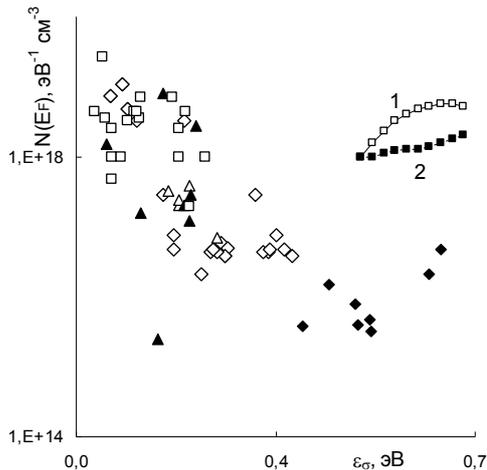


Рис. 4. Взаимосвязь $N_F(\epsilon_\sigma)$ в пленках GaAs, осажденных ИИА на поликор с использованием низкоомной \diamond , \blacklozenge , \blacktriangle и высокоомной мишени \triangle . Данные для a-GaAs, осажденного со-испарением элементов до (1) и после отжига при 550 K (2) [11]

свидетельствуют об усилении влияния на свойства уровней акцепторов, распределенных вблизи ВЗ и доли прыжкового транспорта (рис. 1, 2). Между параметрами $N(E_F)$ и ϵ_σ реализуется обычное для аморфных и некристаллических полупроводников соотношение (рис.4) [15]. Вероятными причинами изменений свойств являются частичная кристаллизация материала пленок, аннигиляция ростовых дефектов, их перезарядка и объединение в кластеры [9–12]. Об этом свидетельствует корреляция между изменениями ϵ_σ , $N_F(T_{отж})$ и оптических параметров пленок [10, 11, 14]. Влияет на свойства и имплантация ионов в поликор – аналогичные изменения оптических и электрических параметров при отжиге свойственны Al_2O_3 после облучения ионами.

Заключение

Электропроводность и фотопроводимость пленок GaAs, синтезированных ИИА на поликоре

с использованием МИП, имеет смешанный p- и p-тип, реализуется одновременно активационным и прыжковым механизмами с участием локализованных в оптической щели состояний дефектов. Соотношение между влиянием уровней дефектов с $\epsilon_\sigma=0.1-0.3$, $0.2-0.4$ и $0.4-0.6$ эВ определяется условиями осаждения и отжига в вакууме при $T_{отж}=300-600$, $600-800$ и $800-1200$ К. Плотность ЛС в ЗЗ при отжиге увеличивается от $N(E_F)=3 \cdot 10^{15}$ до $2 \cdot 10^{19}$ $eV^{-1} cm^{-3}$, а роль прыжкового механизма усиливается.

Список литературы

1. Лунин Л. С., Пащенко А. С. // Журнал Технической Физики. - 2011. - 81, 9. - С.71.
2. Jaouad A., Aimez V., Aktik Ç. // Electronic Letters- 2004. - 40, 16. - P.1024.
3. Hinkle C.L., Sonnet A.M., Vogel E.M., et al. // Applied Physics Letters. - 2007. - 91. - P.163512.
4. Ortiz V., Nagle J., Lampin J.-F., et al. // J. Appl. Phys.- 2007. - 102. - P. 043515-1.
5. Masafumi J., Takaaki M., Kazuaki S. // Appl. Phys. Express. - 2010. - 3. - P. 045502.
6. Mikoushkin V. M., Gordeev Yu. S., Nikonov S. Yu., et al. // Phys. Status Solidi. - 2009. - С. 6. - P. 2655.
7. Reuter H., Schmitt H., Boffgen M. // Thin Solid Films. - 1995. - 254. - P. 96.
8. Coscia U., Murri R., Pinto N., Trojani L. // J. Non-Crystalline Solids - 1996. - 194. - P. 103.
9. El Hadadi B., Carchano H., Seguin J.-L., Tijani H. // Vacuum. - 2005. - 80, 4. - P. 272.
10. Da Silva J.H.D., Campomanes R.R., Leite D.M.G., et al // J. Appl. Phys. - 2004. - 96. - P.7052.
11. Abdel-Wahab F. A., Kotkata M. F // Physica.- 2005. - B368. - P. 209.
12. Erlacher A., Ambrico M., Capozzi V., et al. // Semicnd. Science Technol. - 2004. - 19. - P. 1322.
13. Лопатин В.С., Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., и др. // Приборы и Техника Эксперимента. - 2004. - 4. - С. 70.
14. Кабышев А.В., Конусов Ф.В., Ремнев Г.Е. // Поверхность. - 2011. - 3. - С. 27.
15. Бродски М. Аморфные полупроводники. - М.: Мир, 1982. -119 с.

THE ELECTRICAL TRANSPORT CHARGE OF THE ARSENIDE GALLIUM FILMS, PRODUCED ON POLYCOR BY IONIC ABLATION

Alexander Kabyshev, Fedor Konusov, Sergey Pavlov
Institute of High Technology Physics, Tomsk Polytechnic University. Lenin ave. 30, Tomsk, 634050, Russia,
phone: (83822)419158, fax: (83822)4185660, e-mail: olga.konusova@mail.ru

Energetic characteristics and mechanisms of dark conduction and photoconduction of the arsenide gallium thin films, deposited on the polycrystalline corundum (polycor) by pulsed ions ablation with using of the power ions bunch were investigated. Influence of the vacuum annealing at temperature 300–1200 K and residual pressure 10^{-2} Pa on electrical and photoelectrical characteristics was established. Conduction of the GaAs films, produced by pulsed ionic ablation, has a mixed nature with presence of the n- and p-type of conduction. It realizes simultaneously by activation and hopping mechanisms with participation of intrinsic defects energetic states, localized in optical gap of the films material. Relations between effects on the temperature and field dependencies of conduction parameters and photosensitivity from the trapping centers with activation energies 0.1–0.3, 0.2–0.4 and 0.4–0.6 eV, induced by the defects and their complexes, were determined by deposition conditions and were changed after annealing in the vacuum in three stages $T_{an}=300-600$, $600-800$ and $800-1200$ K. The trapping parameters dispersion was larger, the levels depth and photosensitivity were higher on the deposition edges. The activation transport was dominated in these cases. On the contrary, more stability of characteristics to thermal and field excitation stipulated by the hopping conduction were predominated in films deposited in the plasma flame center. The density of localized states at that was achieved to 10^{19} $eV^{-1} cm^{-3}$. The deposited films have characteristics, which are similar to films produced by other alternative pulsed methods of deposition on the dielectrics. The predominant factors of films properties forming are defects accumulation and clusters on it base formation.