

## ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ НА КРЕМНИИ ИМПУЛЬСНОЙ ИОННОЙ АБЛЯЦИЕЙ И ИХ СВОЙСТВА

А.В. Кабышев, Ф.В. Конусов, С.Н. Ложников, Г.Е. Ремнев

Институт физики высоких технологий, 634028, Томск, пр. Ленина, 2А, Россия,  
тел. (3822) 423870, e-mail: [konusov@hvd.tpu.ru](mailto:konusov@hvd.tpu.ru), [remnev@hvd.tpu.ru](mailto:remnev@hvd.tpu.ru)

Перспективным направлением электроники является объединение соединений  $A^{III}B^V$ , обладающих уникальными оптическими и электрическими свойствами, с кремнием, как эффективной и экономичной подложкой. Проблемы роста полярного полупроводника на неполярной подложке решены частично и стимулируют поиск новых методов получения структур GaAs на Si. Импульсные методы осаждения пленок обладают преимуществами по сравнению с традиционными. Осаждение GaAs из плазмы, создаваемой мощным ионным пучком, не уступает по скорости роста и качеству пленкам, синтезированным импульсными методами. Свойства пленок, осажденных импульсной ионной абляцией изучены недостаточно. В работе исследованы оптические, электрические и фотоэлектрические свойства пленок GaAs, осажденных на поликристаллический кремний из плазмы, сформированной ионным пучком. Установлено влияние на характеристики пленок термического отжига при  $P \leq 10^{-2}$  Па,  $T_{отж} = 300-900$  К. Характеристики пленок GaAs/Si в зависимости от условий их осаждения меняются в широких пределах. Влияние Si отражается на полевых, температурных, энергетических, барьерных и спектральных характеристиках структуры Ag/GaAs/Si. Отжиг меняет свойства пленок вследствие изменения их стехиометрического состава, аннигиляции дефектов, преобразования их в комплексы и изменений морфологии. Оптимальные свойства получены после отжига при 300-600 К.

### Введение

Основными материалами электроники являются кремний, используемый для подложек, и соединения  $A^{III}B^V$ , обладающие уникальными свойствами [1-3]. Объединение этих материалов на одной подложке является перспективным направлением [2-5]. При производстве GaAs/Si возникают проблемы, связанные с ростом полярного полупроводника на неполярной подложке, с различием в параметрах решетки (до 4 %) и коэффициентах термического расширения. Формируются антифазные домены, возникают напряжения и высокая плотность дислокаций вблизи границы раздела [1-3, 5]. Дефекты ухудшают параметры солнечных элементов, фотодиодов и других приборов на основе GaAs/Si-структур [2, 4, 5]. Проблемы эпитаксиального роста GaAs/Si преодолеваются осаждением с применением циклического отжига [3-5], двухступенчатого роста [1, 6], встраивания тонких слоев соединений [1, 2]. Проблема осаждения пленок GaAs/Si решена частично.

Слои GaAs осаждают и импульсными методами: из ВЧ-плазмы [8-10], термического осаждения [11], со-испарения элементов [12] и лазерного осаждения [13, 14]. Пленки обладают уникальными фотоэлектрическими и оптическими свойствами. Осаждение пленок из плазмы, создаваемой мощным ионным пучком, позволяет реализовать высокоскоростное осаждение и формировать пленки на значительных площадях различных подложек [15]. Фотоэлектрические свойства таких пленок изучены недостаточно [16].

Целью работы является исследование оптических, электрофизических и фотоэлектрических свойств пленок GaAs, осажденных на поликристаллический кремний импульсной ионной абляцией (ИИА) с использованием мощных ионных пучков, и их изменение при термическом отжиге в вакууме.

### Результаты и их обсуждение

Пленки получены с использованием ускорителя ТЕМП [15] при следующих параметрах:  $U = 200$  кВ;  $j = 180-230$  А/см<sup>2</sup>,  $t_p \sim 60$  нс, количество им-

пульсов 100, остаточное давление в рабочей камере  $10^{-4}$  Па. Мишень GaAs диаметром 3 см находилась на расстоянии 12 см от диода, под углом  $20^\circ$  относительно нормали плоскости диода, подложка Si располагалась параллельно плоскости мишени, расстояние между мишенью и подложкой составляло 10-12 см. Средняя толщина пленки GaAs, осажденной за один импульс, составляла 2-5 нм, а импульсная скорость осаждения  $\leq 1$  мм/с. Пленки формировались при последовательном осаждении на поликристаллический кремний. Толщина пленок изменялась в интервале  $d = 0.1-0.3$  мкм. Отжиг проводился в вакууме (давление  $P \leq 10^{-2}$  Па,  $T_{отж} = 300-900$  К). Методика измерения поверхностной темновой  $\sigma$  и фотопроводимости  $\Delta\sigma_{hv} = \sigma_{hv} - \sigma$  ( $\sigma_{hv}$  – проводимость при освещении с  $h\nu = 1.5-4.0$  эВ) изложена в [16].

Спектры поглощения  $\alpha(h\nu)$ , рассчитанные по спектрам диффузного отражения, свидетельствуют о хорошем оптическом качестве поверхности подложки и пленок (рис. 1). Особенности при  $h\nu \geq 2.8$  эВ обусловлены влиянием границ в поликристаллическом Si, биографических дефектов, наноразмерных включений и границы между пленкой и подложкой [6, 11, 13]. Увеличение поглощения обусловлено определяющим влиянием оптических процессов в пленке (рис. 1). Нехарактерное для Si и GaAs снижение  $\alpha$  при  $h\nu \geq 1.8$  эВ связано с ограниченностью методики и толщиной пленок  $d < 0.2$  мкм (рис. 1). Проявляется край поглощения и высокоэнергетический сдвиг спектров на 0.1-0.2 эВ для GaAs относительно Si (рис.1). Оптическая щель  $E_g$  для непрямых ( $E_g = 1.10-1.20$  эВ) и прямых (1.40-1.44 эВ) разрешенных переходов в пленках GaAs/Si соответствует ширине 33 кристаллов c-GaAs и  $E_g$  аморфного a-GaAs [9-13, 17]. Спектры  $\alpha(h\nu)$  на поликоре подобны спектрам пленок на кремнии, но поглощение в этих пленках значительно выше (рис. 1).

Взаимосвязь  $\Delta\sigma_{hv}(\sigma)$  важна при выборе полупроводника для изделия [4, 12]. Для Si и GaAs, полученных различными методами, она представляет систему, где  $\Delta\sigma_{hv} \sim \sigma^a$  ( $a = 0.5-1.0$ ) (рис.2).

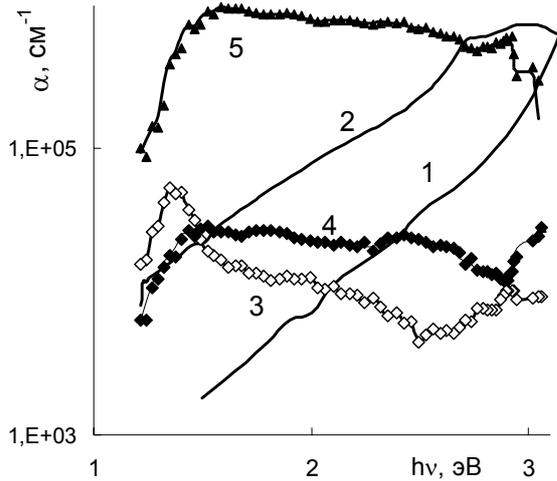


Рис. 1. Спектры поглощения кристаллического Si (1) GaAs (2) по данным [17], кремниевой подложки (3) и пленки GaAs, осажденной ИИА на Si (4) и на поликристаллический корунд (5).

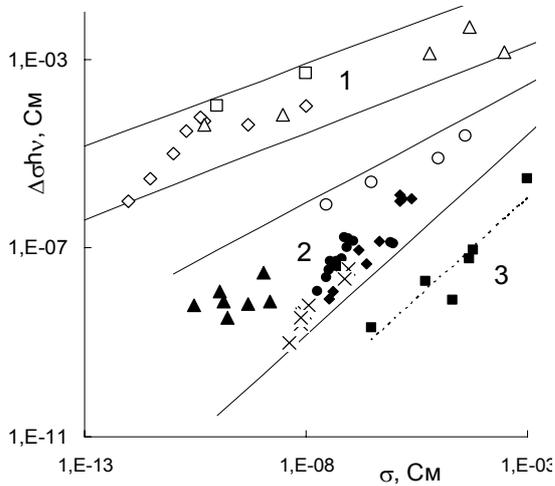


Рис. 2. Взаимосвязь  $\Delta\sigma_{hv}(\sigma)$  в Si и GaAs. Здесь полоса 1: a-Si:H ( $\diamond$ ) [18], a-Si:H ( $\Delta$ ) [19], a-Si:H ( $\square$ ) [20]; полоса 2: a-Si:H ( $\circ$ ) [21], a-GaAs ( $\blacktriangle$ ) [10], поликристаллический Si ( $\times$ ), ИИА пленка GaAs/Si ( $\blacklozenge$ ); полоса 3:  $\blacksquare$  a-GaAs [9].

Для Si приборов фоточувствительность  $K = \Delta\sigma_{hv}/\sigma$  выше. Низкая K свойственна пленкам a-GaAs, полученным из ВЧ-плазмы (рис.2) [9, 10]. Подложка Si для ИИА осаждения GaAs имеет невысокие K вследствие рассеивающего влияния границ (рис.2). В GaAs/Si значения K,  $\Delta\sigma_{hv}$  выше по сравнению с Si и пленками a-GaAs (рис. 2).

Вольт-амперные характеристики I(U) подложки и пленок линейны в интервале  $U=0.1-100$  В [16]. Между K и U реализуется связь  $K \sim U^s$  ( $U=0-5$  В,  $s=0.3-0.4$ ), а при  $U>5$  В,  $K=0.8-1.0$  (рис.3, кривая 1). Она показывает, что плотность локализованных состояний (ЛС) в запрещенной зоне (ЗЗ) кремния возрастает с их глубиной, а ток определяется обменом носителями заряда между ЛС и разрешенными зонами. Влияние полевых переходов с понижением U усиливается (рис. 3). В Si преобладает n-тип  $\Delta\sigma_{hv}$ . Концентрация ЛС доноров выше концентрации акцепторов. Нестабильность K(U) вызвана высокой концентрацией де-

фектов ( $N \geq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ), ЛС которых определяют транспорт (n-тип  $\Delta\sigma_{hv}$ ) (рис. 3). Влияние донорных ЛС на  $\Delta\sigma_{hv}$  и K усиливается, как показывают энергия активации фотопроводимости  $\varepsilon_{hv}=0.05-0.21$  эВ и вид  $\Delta\sigma_{hv}(T)$  (рис. 3, 4). Преобладает прыжковый перенос электронов по ЛС дефектов. Зависимости K,  $\varepsilon_{hv}(U, T)$  показывают, что плотность ЛС в ЗЗ уменьшается с их глубиной в отличие от кремния. Температурное гашение  $\Delta\sigma_{hv}$  обусловлено захватом носителей на глубокие ЛС дефектов на границе GaAs/Si и высокой концентрацией радиационных дефектов (РД) (рис. 4). Влияют и перезарядка глубоких дефектов, а также наночастицы GaAs.

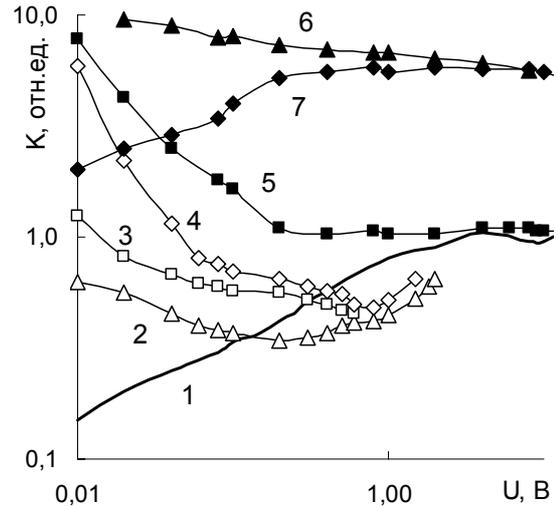


Рис. 3. Полевая зависимость K(U) Si подложки (1) и пленки GaAs, осажденной ИИА, до (2-4) и после отжига при 450 (5), 620 (6) и 720 К (7). Пленки получены на краю осаждения (2) и в центре (3-5, 6).

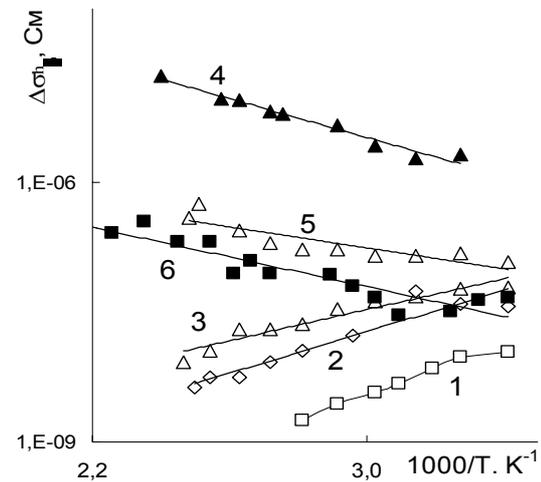


Рис. 4. Температурная зависимость фотопроводимости пленки GaAs/Si до (1, 2) и после отжига при 400 (3), 450 (4), 620 (5) и 900 К (6).

Термообработка меняет величины  $\sigma$ ,  $\Delta\sigma_{hv}$ , K,  $K_i(hv)$ ,  $\varepsilon_{hv}$ , высоту барьера Шоттки  $\varphi_{ФВ}$  системы Ag/GaAs/Si (рассчитана согласно [5, 13]), характер K(U, T) (рис. 3-6). Изменение свойств происходит в две стадии  $T_{отж} = 300-600, 600-900$  К.

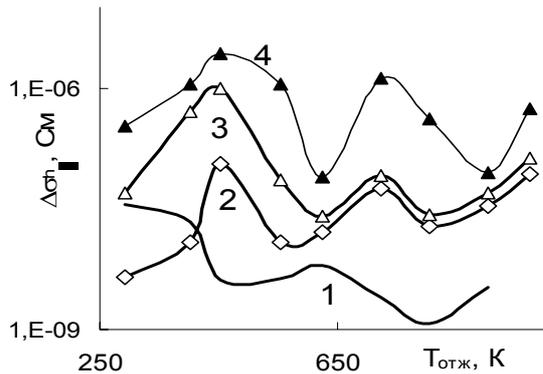


Рис. 5. Влияние отжига на удельную поверхностную (1-3) и объемную фотопроводимость (4) Si (1) и осажденных ИИА пленок GaAs/Si (2-4). Пленки получены на краю (2) и в центре осаждения (3, 4).

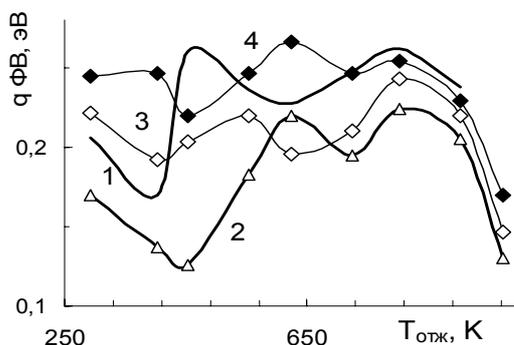


Рис. 6. Влияние отжига на потенциальный барьер Ag/Si (1) и пленки Ag/GaAs/Si (2-4) в центре осаждения (2) и на удалении от него (3, 4).

Отжиг пленок при 300-600 К формирует оптимальные параметры, что свойственно GaAs (рис.3-6) [1, 4, 5]. Разброс в параметрах, связанный с неоднородностью пленок, уменьшается. Происходит снижение концентрации ЛС в  $10^2$ - $10^3$  раз. Гашение  $\Delta\sigma_{\text{фв}}(T)$  исчезает при  $T_{\text{отж}} \geq 450$  К вследствие отжига дефектов (рис. 4). Перераспределение  $K_i(h\nu)$  в длинноволновую область связано с отжигом РД [20-22]. Изменение  $q\text{ФВ}$  подтверждает сильное влияние подложки (рис.6). Меняется степень беспорядка в решетке GaAs [11, 13, 16]. Оптимизация свойств при  $T_{\text{отж}}=600$ -

800 К обусловлена отжигом РД, локализованных на границе, и объединением их в комплексы (рис.5, 6) [16]. Происходит укрупнение наночастиц GaAs и уменьшение аморфной доли структуры [5, 8, 13]. Свойства пленок подвержены более сильному влиянию процессов в кремнии.

### Заключение

Пленки GaAs на Si, полученные ИИА, не уступают по качеству пленкам GaAs, осажженным альтернативными импульсными методами, и превосходят по свойствам пленки на диэлектрических подложках. Наилучшими для применения свойствами обладают пленки, осажженные в центре плазменного факела. Влияние подложки отражается на полевых, температурных, барьерных и спектральных характеристиках структуры Ag/GaAs/Si. Отжиг в вакууме изменяет свойства пленок вследствие аннигиляции дефектов, формирования комплексов и изменения структуры пленок.

### Список литературы

1. Болховитянов Ю. Б. //УФН.-2008.-178, 5.- С. 459.
2. Alberts V., Neethling J.H., Leith A.W. //J. Appl. Phys.-1994.-75, 11.- P. 7258.
3. Hironori T. //Jap.J.Appl.Phys.-2003.-42,12A.-P.L1419.
4. Xiang L., //Sem. Photon. Technol.-2007.-13, 2.- P. 146.
5. Georgakilas A., // J. Appl. Phys.-1992.-71, 6.-P.2679.
6. Shimizu Y. //J.Cryst.Growth.-2004.-265, 1-2.- P.99.
7. Chandrasekan N., Soga T., Jimbo T. //Appl.Phys.Lett.-2003.- 82, 22.- P.3892.
8. El Hadadi B., et al //Vacuum.-2005.- 80, 4.- P.272.
9. Reuter H. //Thin Solid Films.- 1995.-254.- P. 96.
10. Coscia U., et al //J.Non-Cryst.Soli.-1996.-194.- P.103.
11. D. Silva J.H. //J.Non-Cryst.Sol.-2002.-299-302.-P.328.
12. A. -Wahab F.A. //Physica. B.- 2005.-368, 1-4.- P.209.
13. Ullrich B., //Appl.Phys.Lett. 2005.-87, 15.- P. 151115/1.
14. Trelenberg T. //Appl.Surf.Sci.-2004.-221,1-4.- P.364.
15. Saltykov M.S. //Изв. ВУЗов.Физ.-2006.-8.-С. 371.
16. Кабышев А.В., Конусов Ф.В., Ложников С.Н., и др. //Изв. ВУЗ. Физ.- 2008.-11/2.- С. 15.
17. Гавриленко В.И., и др. Оптические свойства полупроводников.- Киев: Наукова Думка, 1987.- 520 с
18. Kakiuchi H.//J.Non-Cryst.Solids.-2005.-351.-P.741.
19. Huiying H. //J.Cryst. Growth.-2005.-281, 2-4.-P.344.
20. Голикова О.А., //ФТП.-1999.- 33, 3.-С.336.
21. Souffi N. //Thin Solid Films.-2006.-501, 1-2.-P.129.
22. Олимов Л.О. //ФТП.-2010.-44, 5.-С. 628.

## DEPOSITION OF ARSENIDE GALLIUM FILMS ON SILICON BY PULSED IONS ABLATION AND THEIR PROPERTIES

A.V. Kabyshev, F.V. Konusov, S.N. Lozhnikov, G.E. Remnev

Institute of High Technology Physics, 634028, Tomsk, Lenin av., 2A, Russia, phone: (83822) 423870,

e-mail: [konusov@hvd.tpu.ru](mailto:konusov@hvd.tpu.ru), [remnev@hvd.tpu.ru](mailto:remnev@hvd.tpu.ru)

Advanced direction in electronics is conjunction  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$  compounds, obtained uncial optical and electrical properties, with silicon as an effective and low-price substrate. Problems of growth of the polar semiconductor on the nonpolar substrate were decided partly and this fact stimulates the search of new methods of producing structures GaAs on Si. Pulsed methods of deposition of films obtain advantages compare with traditional ones. Deposition GaAs from plasma created by power ions beams not yields the pas in growth velocity and quality to films sintered by pulsed methods. Properties of films deposited by pulsed ions ablation were studied insufficiently. In work the optical, electrical and photoelectrical properties of films GaAs, deposited on polycrystalline silicon from plasma formed by ions beam were investigated. The effect of thermal annealing at  $P \leq 10^{-2}$  Pa,  $T_{\text{ан}}=300$ -900 K on the films characteristics was established. Films GaAs/Si characteristics in dependence from deposition conditions change in wide limits. The Si influence reflects on field, temperature, energetic, barrier and spectral characteristics of the structure Ag/GaAs/Si. Annealing change properties of films owing to a change their stoichiometry, defects annihilation, its transformation into complexes and changes in morphology. Optimal properties were obtained after annealing at 300-800 K.

