

Электронные состояния в приповерхностной области арсенида галлия, обработанной в парах селена с мышьяком

© Н.Н. Безрядин, Э.П. Домашевская, И.Н. Арсентьев*, Г.И. Котов, Р.В. Кузьменко, М.П. Сумец

Воронежская государственная технологическая академия,
394000 Воронеж, Россия

*Физико-технический институт им. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 29 октября 1998 г. Принята к печати 10 ноября 1998 г.)

Методами изотермической сканирующей спектроскопии глубоких уровней исследованы параметры центров локализации заряда в приповерхностной области арсенида галлия, обработанной в парах селена с мышьяком. Установлено, что добавление в паровую фазу мышьяка замедляет скорость реакции гетеровалентного замещения мышьяка на селен в GaAs и уменьшает концентрацию центров в приповерхностной области GaAs.

С целью снижения плотности электронных состояний на поверхности арсенида галлия используется обработка подложек в халькогеносодержащей среде [1,2] и, в частности, в парах селена [3]. Эффект от воздействия паров селена на плотность поверхностных электронных состояний (ПЭС) [3] объяснен в работе [4] реконструированием поверхности GaAs(100) по типу (3×2) и последующей стабилизацией этой реконструкции туннельно-прозрачным псевдоморфным слоем $Ga_2Se_3(110)$. Характерно, что снижение плотности ПЭС (т.е. исчезновение максимума в спектрах изотермической сканирующей спектроскопии глубоких уровней (ИССГУ), отвечающе-

го этим состояниям [4], и открепление уровня Ферми на поверхности GaAs [1–3]) происходит независимо от используемого для обработки халькогена (S, Se, Te) и наблюдается также при проведении совместной обработки в парах селена с мышьяком [4].

Известно [5], что присутствие мышьяка в камере квазизамкнутого объема (КЗО) при проведении процессов обработки полупроводника $A^{III}B^V$ в халькогене может изменить характер протекания реакции гетеровалентного замещения (ГВЗ). В этой же работе установлено изменение в присутствии мышьяка не только скорости реакции ГВЗ, но и ее механизма и, как следствие,

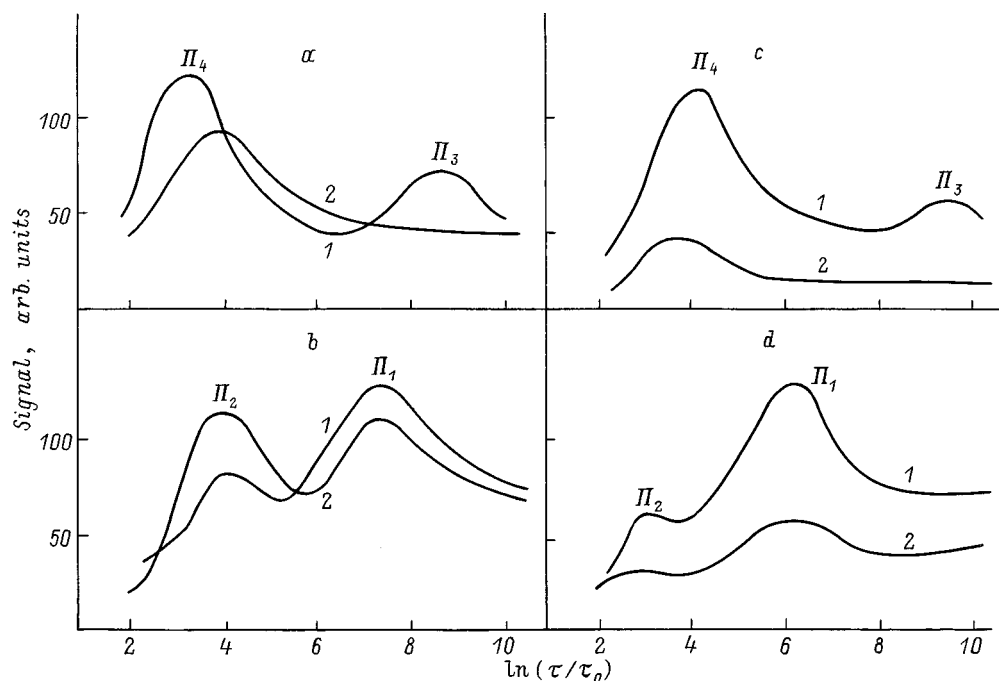


Рис. 1. Типичные спектры ИССГУ при температурах T , К: a, c — 350, b, d — 170 для структур Al-GaAs, полученных без предварительной обработки подложек (кривые 1), после обработки в парах Se в течение 5 мин (рис. a и b , кривые 2) и после обработки подложек в парах Se + As в течение 45 мин (рис. c и d , кривые 2). Величина τ_0 — максимальное, задаваемое в экспериментах значение постоянной времени релаксации.

уменьшение плотности макроскопических структурных дефектов в пограничной области формируемого таким способом гетероперехода.

В данной работе анализируется влияние мышьяка на электрические характеристики поверхности арсенида галлия (100), обработанной в КЗО в парах селена с мышьяком. Исследования проведены на диодах Шоттки, сформированных напылением через маску контактов из Al на необработанную поверхность GaAs (прошедшую только химико-динамическое полирование и снятие подслоя естественного оксида по методике [3,4]), а также обработанную в парах селена и селена с мышьяком. Обработки в парах проводились в КЗО в условиях, подобных используемым в работах [3,4].

На рис. 1 приведены спектры ИССГУ диодов Al-GaAs (GaAs-типа, $n \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$), сформированных после обработки подложки как в парах селена (рис. 1, а), так и в парах селена с мышьяком (рис. 1, с) при фиксированных температурах. Для определения энергии активации центров спектры ИССГУ анализировались в диапазоне температур $90 \div 400 \text{ К}$. Отделение вклада поверхностных состояний в сигнал ИССГУ от вклада центров в приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ) проводилось, как и в [4], по зависимости амплитуды пиков от величины инжектирующего импульса.

Как и в работе [4], в спектрах ИССГУ исчезал максимум при значении $\ln \tau / \tau_0 \sim 9$, отвечающий ПЭС (пик П₃, следуя обозначениям, принятым в работе [4]), т.е. на уменьшение плотности ПЭС обработка в парах одного селена и селена с мышьяком оказывают практически одинаковое влияние, что ранее отмечалось в работе [3]. Большая длительность совместной обработки Se + As обусловлена уменьшением скорости реакции ГВЗ мышьяка в GaAs на Se в присутствии паров мышьяка в КЗО. Это время выбиралось из сопоставления результатов измерения методом вольт-амперных характеристик высоты барьера Шоттки (φ_b) и методом эллипсометрии — толщины формируемого в процессе обработки слоя халькогенида. Значение $\varphi_b \approx 0.46 \text{ эВ}$ для образцов с Al-контактом, полученных после 5-минутной обработки в парах Se, соответствовало значению $\varphi_b \approx 0.44 \text{ эВ}$ для образцов, полученных обработкой в парах Se с As за время порядка 45 мин. Измеренная толщина слоя в том и другом случаях соответствовала 5 нм (с точностью 5%).

Состояния в приповерхностной области пространственного заряда арсенида галлия оказались чувствительны к присутствию мышьяка в камере КЗО (рис. 1, с, d). Максимум сигнала ИССГУ для всех типов центров в ОПЗ уменьшался после совместной обработки Se + As по сравнению с обработкой в одном селене. Отметим, что в случае обработки в одном селене максимум при значении $\ln \tau / \tau_0 \sim 4$ (пик П₂) даже увеличивался по сравнению с образцом, не проходившим обработку в парах селена (рис. 1, b).

Центры, обуславливающие максимумы в спектрах ИССГУ проявляются и в изотермической релаксации емкости исследуемых гетероструктур при комнатной

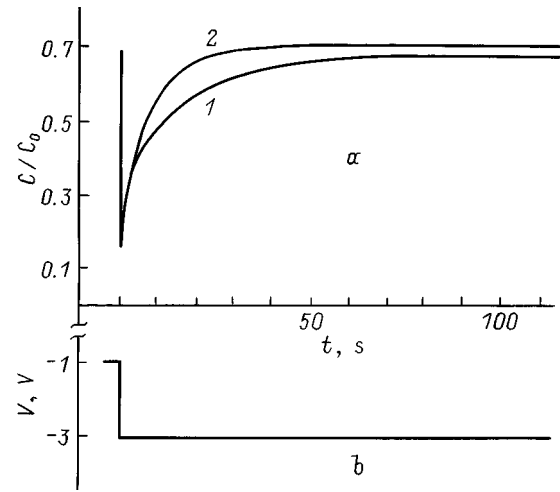


Рис. 2. Зависимости емкости гетероструктур Al-GaAs от времени (а) после подачи обедняющего импульса напряжения $V(t)$ (b). Величина C_0 — емкость структуры до подачи импульса напряжения. Зависимости на рис. а получены: 1 — без предварительной обработки подложки, 2 — с обработкой в Se.

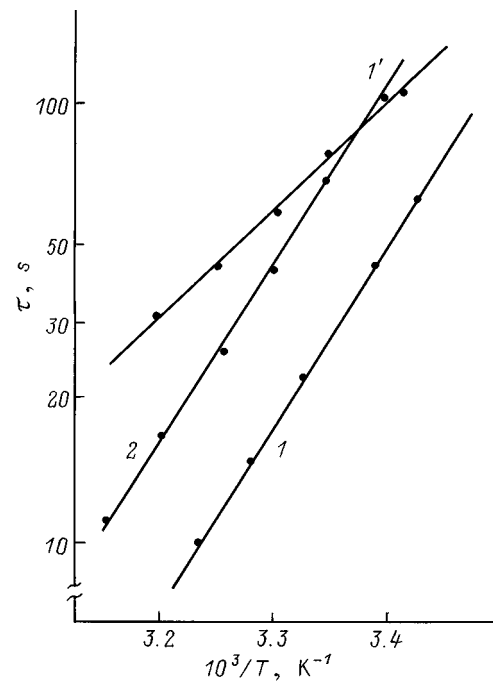


Рис. 3. Зависимость постоянной времени релаксации емкости от температуры для гетероструктур Al-GaAs, не обработанных в селене (1, 1') и обработанных в парах селена в течение 5 мин (2); 1 и 1' — значения постоянной времени на начальных и конечных участках релаксации емкости соответственно.

температуре (рис. 2). Для диодов Шоттки, приготовленных сразу после химико-динамического полирования (без обработки в халькогене) характерно затягивание релаксации емкости (рис. 2, а, кривая 1). Обработка в одном селене устраняет этот длинновременной участок

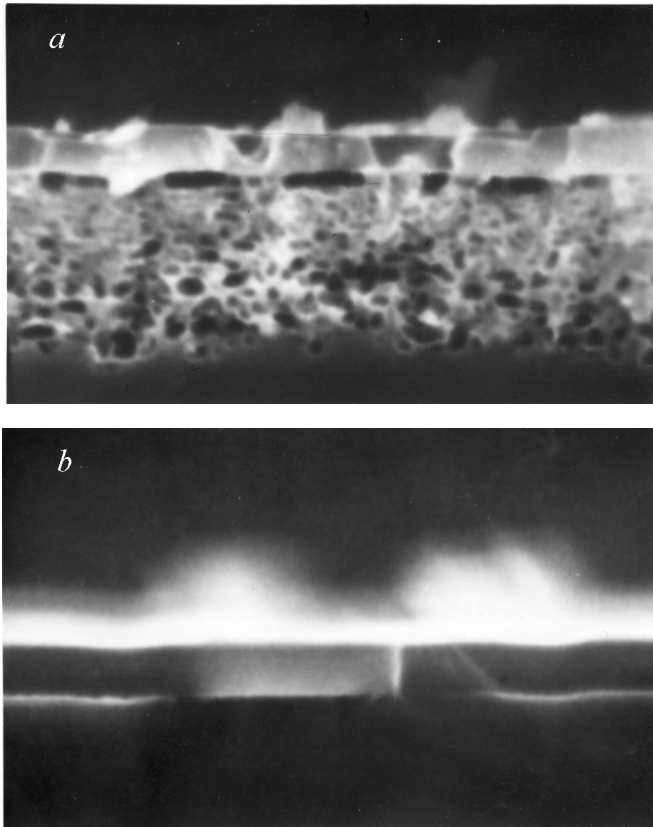


Рис. 4. Микрофотографии поперечных изломов образцов из арсенида галлия, обработанного в парах одного селена (*a*) и в парах селена с мышьяком (*b*). Изображения получены в растровом электронном микроскопе; увеличение $\times 150\,000$. Чтобы иметь возможность наблюдать в микроскопе сформированный реакцией замещения слой Ga_2Se_3 , обработка в парах проводилась при более высоких температурах, чем указано в работах [3,4].

(рис. 2, *a*, кривая 2). После совместной обработки в $\text{Se} + \text{As}$ в том же масштабе времени характер зависимости емкости от времени зарегистрировать не удастся, что обусловлено значительным уменьшением постоянной времени этого релаксационного процесса. С целью выяснения природы такого изменения релаксационных характеристик исследуемых структур изучалась температурная зависимость постоянной времени изменения емкости после приложения обедняющего импульса напряжения (рис. 3). Соответствующие конечным этапам релаксации значения постоянной времени в координатах $\ln \tau$ от $1/T$ хорошо укладываются на прямую с наклоном, соответствующим энергии активации порядка 0.4 эВ (рис. 3, кривая 1). Это значение соответствует энергии активации ПЭС, определенной методом ИССГУ (пик П_3 , рис. 1, *a*). Этот максимум, как отмечалось выше, исчезает после обработки в парах селена (рис. 1, *a*, кривая 2). В релаксации емкости также не наблюдается длинновременного участка после обработки в халькогене (рис. 2). Таким образом, затягивание релаксации ем-

кости структур, сформированных на необработанных в селене подложках GaAs, обусловлено ПЭС с энергией активации порядка 0.4 эВ. С изменением температуры зависимости от $1/T$ постоянных времени начальных участков релаксационного изменения емкости структур, полученных как с обработкой (рис. 3, кривая 2), так и без обработки в парах селена (рис. 3, кривая 1'), также хорошо описываются прямой в координатах $\ln \tau$ от $1/T$. При этом наклон зависимостей одинаков и соответствует энергии активации порядка $0.7 \div 0.8$ эВ. Этому значению энергии отвечает пик П_4 в спектрах ИССГУ (рис. 1, *a*, *c*, кривые 1, 2). Амплитуда этого максимума существенно снижается только в результате совместной обработки подложек в парах селена с мышьяком (рис. 1, *c*, кривая 2). Это уменьшение концентрации центров в приповерхностной ОПЗ GaAs, по-видимому, и является основной причиной снижения времени релаксации емкости структур, прошедших предварительную обработку подложек в КЗО в парах селена с мышьяком.

Совместная обработка в $\text{Se} + \text{As}$ уменьшает амплитуду всех максимумов (пики П_1 , П_2 , П_4 в спектрах ИССГУ, рис. 1), отвечающих центрам в ОПЗ арсенида галлия. Механизм этого процесса не может быть установлен по совокупности анализируемых в данной работе экспериментальных результатов. Наиболее вероятной причиной такого поведения центров в ОПЗ GaAs является, на наш взгляд, снижение концентрации макроскопических дефектов в приповерхностной области арсенида галлия (под формируемым в результате замещения мышьяка на селен псевдоморфным слоем Ga_2Se_3 [3,4]) в результате совместной обработки в селене с мышьяком (рис. 4, *a*, *b*).

Таким образом, присутствие мышьяка в камере КЗО оказывает превалирующее воздействие на концентрацию центров в приповерхностной области GaAs, а не на плотность ПЭС. Это сопровождается снижением количества макроскопических дефектов у поверхности GaAs. На плотность ПЭС в GaAs определяющее влияние оказывает обработка поверхности в халькогене.

Список литературы

- [1] Р. Victorovich. Rev. Phys. Appl., **9**, 895 (1990).
- [2] Б.И. Бедный, Н.В. Байдусь. ФТП, **29**, 1488 (1995).
- [3] Б.И. Сысоев, Н.Н. Безрядин, Г.И. Котов, В.Д. Стрыгин. ФТП, **27**, 131 (1993).
- [4] Б.И. Сысоев, Н.Н. Безрядин, Г.И. Котов, Б.Л. Агапов, В.Д. Стрыгин. ФТП, **29**, 24 (1995).
- [5] Б.И. Сысоев, Б.Л. Агапов, Н.Н. Безрядин, Т.В. Прокопова, Ю.К. Шлык. Неорг. матер., **12**, 1449 (1996).

Редактор Т.А. Полянская

Electron states in sub-surface layer of GaAs treated in vapour streams of Se and As

N.N. Bezryadin, A.P. Domashevskaya, I.N. Arsent'ev,
G.I. Kotov, R.V. Kuzmenko, M.P. Sumetz

State Technological Academy,
394000 Voronezh, Russia
A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract Parameters of centers of localization of charges lying in the sub-surface area of GaAs (the surface was treated in vapour streams of Se and As) were investigated with the help of isothermal scanning spectroscopy of deep levels. It was established that the rate of the reaction of heterovalent replacement of As to Se will be less if As is added to the vapour phase. The concentration of centers in the sub-surface layer of GaAs will be lower, too.