

©1994 г.

## ИНДУЦИРОВАННОЕ УЛЬТРАЗВУКОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ $DX$ -ЦЕНТРОВ В $AlGaAs:Si$

*А.Е.Беляев, Х.Ю.фон Барделебен,\* Е.И.Оборина, Ю.С.Рябченко,  
А.У.Савчук, М.Л.Фийе,† М.К.Шейнжман*

Институт физики полупроводников Академии наук Украины,  
252650, Киев, Украина

\*Группа физики твердого тела, Университет Париж VII, Франция

†Лаборатория физики твердого тела и солнечной энергии, НЦНИ,  
Валбонн, Франция

(Получена 16 декабря 1993 г. Принята к печати 22 декабря 1993 г.)

На примере  $DX$ -центра продемонстрирована эффективность применения ультразвука для исследования структуры глубоких центров. В частности, показано, что при фотоионизации основного состояния  $DX$ -центра, проводимой совместно с динамической деформацией образца, проявляются оба нейтральных состояния,  $d^0$  (атом в узле замещения) и  $DX^0$  (атом смещен из узельной позиции). Более того, при определенной амплитуде деформации возможен внутрицентровый переход ( $d^0 \rightarrow DX^0$ ) с последующим захватом электрона ( $DX^0 + e \rightarrow DX^-$ ), что приводит к уменьшению скорости нарастания фотопроводимости.

В настоящее время достигнут достаточно высокий уровень понимания природы и свойств  $DX$ -центров в соединениях  $A^{III}B^V$  и твердых растворах на их основе. Большое различие между энергиями термического и оптического возбуждения  $DX$ -центров явилось основой развития представления о них как о многозарядных дефектах с отрицательной корреляционной энергией — модель сильно релаксированной решетки [1,2]. Однако существует ряд экспериментальных данных, которые не нашли объяснения в рамках этой модели, но согласуются с моделью слабой релаксации решетки [3,4]. Эффективным способом разрешения подобного противоречия может оказаться рассмотрение поведения  $DX$ -центра в условиях различного рода внешних воздействий. Это и определило цель нашей работы — исследование влияния динамической деформации на долговременную фотопроводимость (ДВФП) эпитаксиальных пленок  $AlGaAs$ .

Нами исследовались пленки  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ , полученные эпитаксией из металлорганических соединений на подложке из полуизолирующе-

го GaAs. Толщина пленок составляла  $\sim 1$  мкм. Пленки легировались кремнием до концентрации  $\sim 10^{18}$  см $^{-3}$ . Для предотвращения влияния двухмерного электронного газа, возникающего на внутренней границе раздела, между пленкой и подложкой создавался буферный слой из нелегированного Al $_{0.3}$ Ga $_{0.7}$ As. Омические контакты в холловской конфигурации создавались вплавлением Au-Ge эвтектического сплава. Динамическая деформация образцов достигалась введением в них ультразвуковых колебаний (УЗК). Источником ультразвука служил прямоугольный пьезоэлектрический вибратор, изготовленный из пьезокерамики ПТС-19, с резонансными частотами 100–300 кГц. Резонансная частота определялась линейными размерами преобразователя в направлении, вдоль которого распространялась продольная акустическая волна, возбуждаемая поперечным электрическим полем. Использование системы составного вибратора позволяло возбуждать продольные колебания образца. Расчетная величина относительной деформации при этом составляла  $10^{-5}$ – $10^{-8}$  в зависимости от амплитуды выходного напряжения генератора. Охлаждение образцов до температуры, при которой наблюдается ДВФП (в случае легирования кремнием  $T = 77$  К), проводилось с постоянной скоростью 5 К/мин с целью достижения постоянного уровня «вымораживания» носителей. Возбуждение фотопроводимости осуществлялось монохроматическим светом. Последующая температурная релаксация ДВФП исследовалась при постоянной скорости нагрева 1 К/мин в темноте.

Спектральная зависимость ДВФП имеет пороговый характер с  $\hbar\omega_{\text{thr}} \cong 0.8$  эВ, что согласуется с большинством данных, имеющихся к настоящему времени (см., например, [5]). Кривые нарастания фотопроводимости немонотонны, что особенно заметно по мере убывания энергии кванта возбуждающего света. Такую форму кривой нарастания можно объяснить, если рассматривать процесс фотоионизации основного состояния  $DX$ -центра ( $DX^-$ ) как двухступенчатый процесс с участием промежуточного состояния ( $DX^0$ ) и при этом наряду с ионизацией учитывать процессы захвата. В такой ситуации использовать метод начальных наклонов [6] для определения сечения фотоионизации  $DX^-$ -уровня не вполне корректно, так как получаемое значение представляет собой достаточно сложную комбинацию сечений захвата и ионизации, включающих основное, промежуточное состояния дефекта и зону проводимости. Однако этим методом можно воспользоваться, чтобы определить некоторое эффективное сечение фотоионизации  $\sigma_{\text{eff}}$ , характерное для данной многоуровневой системы, с тем чтобы получить его качественную зависимость от условий возбуждения.

На рис. 1 представлена зависимость такого эффективного сечения фотоионизации от энергии кванта возбуждающего света. Кривая 1 соответствует случаю без УЗК, а кривая 2 получена при наличии УЗК. Видно, что динамическая деформация образца приводит к появлению провала на спектральной зависимости  $\sigma_{\text{eff}}$  в полосе  $(1.0 \pm 0.3)$  эВ, что может быть объяснено включением эффективного канала захвата носителей из зоны проводимости, т.е. эффектом отрицательной фотопроводимости (ОФП). Следует отметить, что при возбуждении светом из полосы, соответствующей ОФП, появляется «быстрая» ( $\tau \cong 10^{-3}$  с) компонента нарастания фотопроводимости, связанная с присутствием

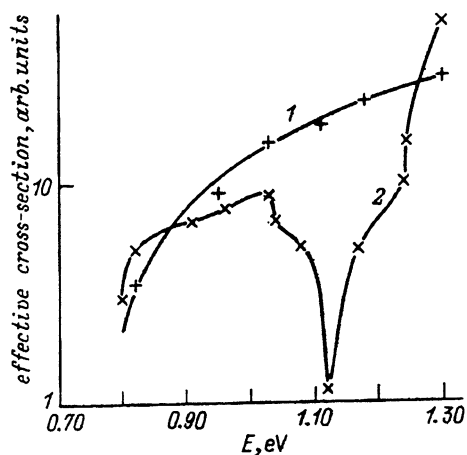


Рис. 1. Спектральная зависимость эффективного сечения фотоионизации DX-центра. 1, 2 — экспериментальные данные, полученные в отсутствие (1) и при наличии (2) ультразвуковых колебаний.  $T = 77$  К.

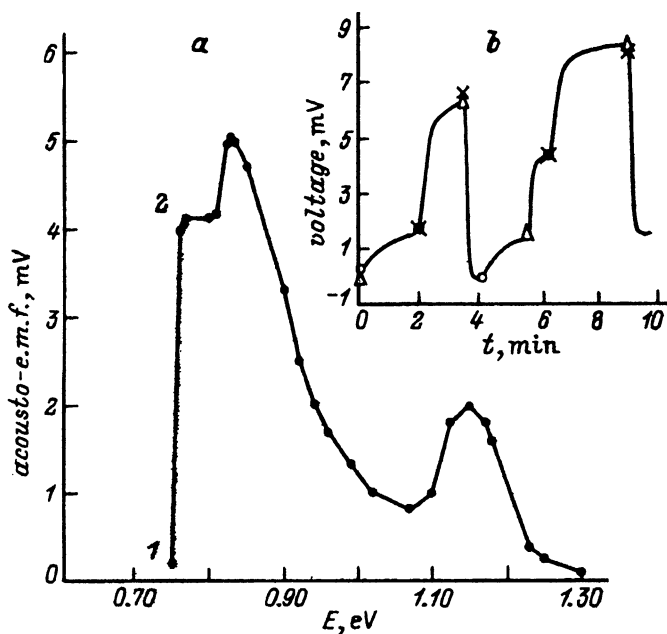


Рис. 2. а — спектральная зависимость акустоэдс. Точка 1 соответствует моменту включения ультразвукового преобразователя, 2 — моменту включения освещения.  $T = 77$  К.

б — кинетика нарастания фотопроводимости при включении (открытые символы) и выключении (перечеркнутые символы) освещения (кружки) и ультразвука (колокольчики).  $T = 77$  К,  $E = 1$  эВ.

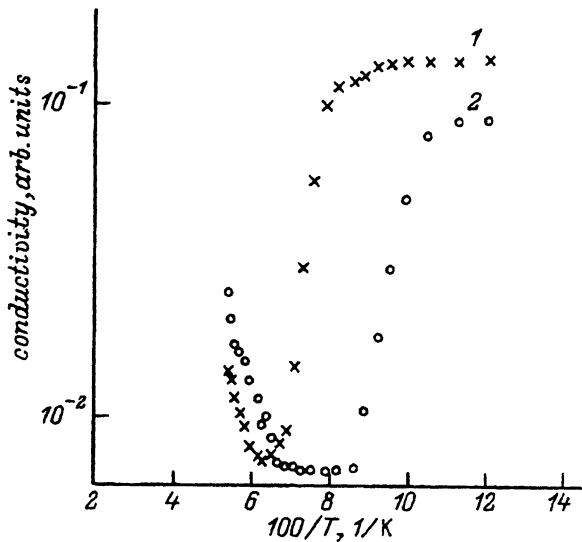


Рис. 3. Температурная релаксация долговременной фотопроводимости в отсутствие (1) и при наличии (2) ультразвуковых колебаний.

УЗК (см. рис. 2, б). Указанный эффект не наблюдается при возбуждении светом вне данной полосы, а также при отсутствии УЗК. Кроме того, обращает на себя внимание появление акустоэдс при ультразвуковом воздействии как следствие проявления акустоэлектрического эффекта, т.е. увлечения электронов проводимости звуковой волной [7]. Измеряемая акустоэдс соответствовала величине напряжения  $\Delta U$ , возникающего на токовых контактах в разомкнутой цепи в процессе распространения упругой волны. Спектральная зависимость  $\Delta U$  при освещении образца светом в диапазоне длин волн 0.8–1.5 мкм коррелирует со спектральной зависимостью эффективного сечения фотоионизации DX-центра (рис. 2) и, по-видимому, отражает изменение концентрации свободных носителей в зоне проводимости.

Характерной особенностью, связанной с УЗК, является также влияние ультразвука на процесс температурной релаксации ДВФП. Общая закономерность заключается в понижении температурного порога начала релаксации в присутствии УЗК (рис. 3).

Полученные результаты могут быть объяснены, если предположить, что в условиях динамической деформации образуется новый дефект, основные черты которого:

- а) дефект образуется на основе DX-центра;
- б) процесс трансформации, т.е. образование и распад, — динамический процесс;
- в) фотопроводимость, обусловленная этим дефектом, не носит долговременный характер;
- г) возбуждение светом в полосе  $\hbar\omega = 1.0$  эВ переводит данный дефект в метастабильное состояние, с которым связан эффект отрицательной фотопроводимости.

Таким образом, под действием динамической деформации совместно с «активным» светом  $DX$ -центры претерпевают обратимые конфигурационные преобразования. Модель таких преобразований может быть построена с привлечением к рассмотрению одноэлектронного состояния, подобного  $DX^0$ , проявляющего себя при деформации. Фотоионизация основного  $DX$ -состояния переводит один электрон в зону проводимости и оставляет донор в нейтральном состоянии. Природа последнего до сих пор остается предметом дискуссий. Существуют две точки зрения. Согласно первой [1],  $DX^0$  рассматривается как одноэлектронное состояние в сильно искаженной решетке (с тем же самым значением конфигурационной координаты  $Q$ , что и  $DX^-$ ) с полной энергией большей, чем для  $DX^-$ , на величину корреляционной энергии  $U$ . Такое состояние должно быть термодинамически нестабильным [1], что не мешает ему играть существенную роль промежуточного состояния во всех процессах ионизации и захвата электронов. Данное утверждение имеет экспериментальное подтверждение [8]. Вторая точка зрения, обсуждаемая в работе [9], рассматривает нейтральное состояние  $DX$ -центра как одноэлектронное глубокое состояние, образованное антисвязывающими орбиталями короткодействующей части кулоновского потенциала. Конфигурационная парабола, отвечающая этому состоянию, имеет минимум в  $Q_0$ , что характерно для центра в неискаженной решетке. Замещение атомов галлия атомами алюминия в твердых растворах AlGaAs может приводить к слабой решеточной релаксации данного состояния. Кроме того, энергия этого состояния (обозначаемого в [10] как  $A_1(ab)$ ) зависит как от химической природы донора, так и от состава твердого раствора. В нашем случае (Si как легирующая примесь, и  $x = 0.3$ )  $A_1(ab)$ -состояние расположено несколько выше дна зоны проводимости  $\Gamma$  [10], т.е. является резонансным. Возврат донора в основное  $DX^-$ -состояние, согласно этой точке зрения, происходит в две стадии: вначале захват электрона в  $A_1(ab)$ -состояние, а затем захват второго электрона в  $DX^-$ -состояние.

Мы полагаем, что оба нейтральных состояния, а именно  $d^0$  (атом в узле замещения) и  $DX^0$  (атом смещен из узельной позиции), могут сосуществовать. Ультразвук формирует в образце синусоидальное деформационное поле или поле смещений. В этом поле расстояние между  $Q$  и  $Q_0$  будет периодически изменяться. Ясно, что уменьшение  $(Q - Q_0)$  приводит к понижению барьера для захвата электрона в  $DX^-$ -состояние. Более того, при определенной амплитуде деформации возможен внутрицентровый переход ( $d^0 \rightarrow DX^0$ ) с последующим захватом электрона ( $DX^0 + e \rightarrow DX^-$ ). В результате скорость нарастания фотопроводимости будет уменьшаться.

Полученные результаты согласуются с данными работы [11], где методом рентгеновского анализа показано, что для твердых растворов AlGaAs:Si, Sn процесс фотоопустошения  $DX$ -центров сопровождается изменением параметра решетки. Величина деформации зависит от типа примеси и соизмерима с расчетной деформацией, создаваемой нами при введении ультразвуковых колебаний.

В заключение следует отметить, что полученные данные можно рассматривать как свидетельство в пользу модели сильной решеточной релаксации. Кроме того, наглядно продемонстрирована эффектив-

ность применения ультразвука для исследования структуры глубоких центров.

Работа выполнялась в рамках договора о научном сотрудничестве между Национальным центром научных исследований (Франция) и Академией наук Украины.

#### Список литературы

- [1] D.J. Chadi, R.J. Chang. Phys. Rev. B, **39**, 10063 (1989).
- [2] P.M. Mooney. Appl. Phys. Rev.: J. Appl. Phys., **67**, R1 (1990).
- [3] J.C. Henning, J.P. Ansems. Semicond. Sci. Techn., **2**, 1 (1987).
- [4] E. Yamaguchi, K. Shiraishi, T. Ohno. Proc. 20th ICPS, ed. by E.M. Anastassakis, J.D. Joannopoulos (Singapore, World Scientific, 1990) p. 501.
- [5] G.A. Northrop, P.M. Mooney. J. Electron. Mater., **20**, 13 (1991).
- [6] В.Е. Лашкарев, А.В. Любченко, М.К. Шейнкман. *Неравновесные процессы в полупроводниках* (Киев, Наук. думка, 1981).
- [7] В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. *Физика полупроводников* (М., Наука, 1977).
- [8] L. Dobaczewski, P. Kaczor. Phys. Rev. Lett., **66**, 68 (1991).
- [9] M. Lannoo. Semicond. Sci. Techn., **6**, 16 (1991).
- [10] H.J. von Bardeleben, J.C. Bourgoin, C. Delerue, M. Lannoo. Phys. Rev. B., **44**, 9060 (1991).
- [11] G.S. Gargill III, A. Segmuller, T.F. Kuech, T.N. Thies. Phys. Rev. B., **46**, 10178 (1992).

Редактор В.В. Чалдышев

#### Ultrasound Induced Transformation of DX-centers in AlGaAs:Si

*A.E. Beljaev, Kh. Yu. fon Bardeleben, E.I. Oborina, Yu.S. Riabchenko,  
A.I. Savchuk, M.L. Fije and M.K. Sheinkman*

Institute of Semiconductors, Academy of Sciences of the Ukraine, 252650, Kiev, Ukraine