

©1995

БЕЗАКТИВАЦИОННОЕ ДВИЖЕНИЕ ДОНОРОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА В КРИСТАЛЛАХ CdS

*Л.В.Борковская, Б.Р.Джумаев, И.А.Дроздова, Н.Е.Корсунская,
И.В.Маркевич, А.Ф.Сингаевский, М.К.Шейнман*

Институт физики полупроводников Академии наук Украины,
252650, Киев, Украина
(Поступила в Редакцию 16 марта 1995 г.)

Впервые обнаружен безактивационный процесс собирания доноров на стоки в кристаллах CdS под действием импульсного ультразвука, протекающий за время 10^{-5} с как при 300, так и при 77 К. Восстановление исходного состояния происходит в течение суток с энергией активации диффузии доноров.

Проблема элементарных механизмов термической и стимулированной диффузии и трансформации дефектов в полупроводниках важна как для физики дефектов в твердых телах, так и для развития новых полупроводниковых технологий. Диффузию и перестройку дефектов можно стимулировать различными внешними факторами. Одним из таких факторов является ультразвук. Известно, что слабые ультразвуковые обработки, которые не вызывают размножения дислокаций и появления новых дефектов, могут стимулировать перестройку и перераспределение дефектов. В частности, такие процессы наблюдались в кристаллах CdS [1], Si [2-4], GaAs [5] и др. Как было показано, все эти процессы являются термоактивационными [1-5].

В данной работе впервые наблюдалось безактивационное движение мелких доноров в кристаллах CdS, стимулированное импульсным ультразвуком.

1. Методика эксперимента

Исследовались объемные высокоомные фоточувствительные кристаллы CdS, выращенные методом сублимации. Кристаллы обрабатывались при 300 и 77 К импульсами ультразвука, возбуждаемого импульсом излучения рубинового лазера наносекундной длительности [6]. Для того чтобы устранить возможное влияние на образец света, на облучаемую поверхность приклеивалась медная фольга. Измерения интенсивности и формы ультразвукового импульса осуществлялись путем измерения акустоэдс, возникающей в облучаемом кристалле. Оказалось, что ультразвук, возбуждаемый лазерным импульсом,

представляет собой пуг затухающих импульсов со временем затухания $\tau_{US} \approx 10^{-5}$ s. Интенсивность первого импульса в пуге составляет ~ 2.5 mV при плотности мощности излучения $P = 10^{12}$ W/cm², что соответствует относительной деформации $\sim 1.5 \cdot 10^{-4}$. Как показывают опыты по селективному травлению кристаллов, размножения дислокаций при этом не происходит.

Измерялись спектры фототока (I_{ph}), термостимулированной проводимости (ТСП), люкс-амперные характеристики (ЛАХ) фототока, а также кривые релаксации фототока после обработки.

2. Результаты и их обсуждение

После облучения ультразвуком как при 300 К, так и при 77 К в ряде исследуемых кристаллов наблюдалось уменьшение величины стационарного фототока I_{ph} . В обоих случаях эффект регистрировался уже через 10^{-5} s после облучения, т. е. время протекания процесса меньше τ_{US} .

Величина I_{ph} падала во всем спектральном диапазоне (рис. 1). ЛАХ фототока до и после облучения приведены на рис. 2. До облучения на ЛАХ наблюдаются два участка с наклонами $\alpha = 1$ и 0.5. Точка перегиба ЛАХ определяет величину так называемой квазимемной концентрации дырок на центрах медленной рекомбинации p_{ro} , возникающей вследствие процессов перелокализации электронов с центров рекомбинации на центры прилипания при освещении [7]. В самом деле, время жизни фотоэлектронов в c -зоне $\tau_n = 1/[c_r(p_{ro} + n)]$ [7], где c_r — коэффициент захвата электронов r -центрами, n — концентрация фотоэлектронов в c -зоне. На линейном участке ЛАХ $p_{ro} \gg n$ и $\tau_n \approx 1/(c_r p_{ro})$, на сублинейном участке $n \gg p_{ro}$ и $\tau_n \approx 1/(c_r n)$, т. е. в точке перегиба $n \approx p_{ro}$. Как видно из рис. 2, после облучения ЛАХ остается линейной вплоть до максимальных значений n , достигаемых в эксперименте, что свидетельствует о росте p_{ro} . Увеличение p_{ro} приводит к уменьшению τ_n , а следовательно, и I_{ph} на линейном участке ЛАХ. Рост p_{ro} означает

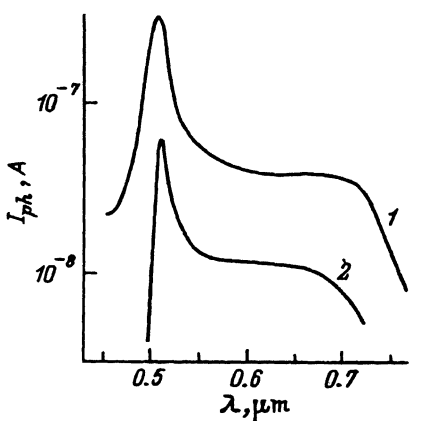


Рис. 1. Спектры фототока до (1) и после (2) облучения ультразвуком.

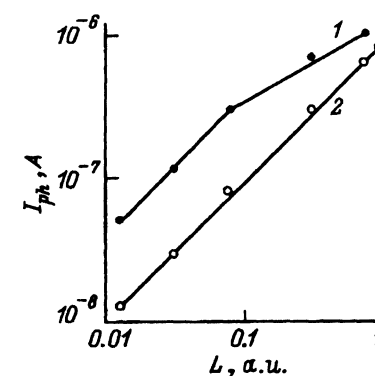


Рис. 2. ЛАХ фототока при 300 К до (1) и после (2) облучения ультразвуком.

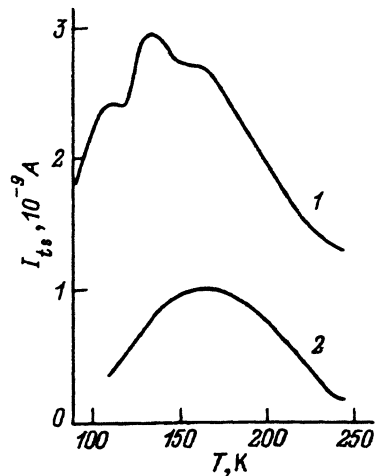


Рис. 3. Спектры ТСП типичного образца до (1) и после (2) облучения ультразвуком.

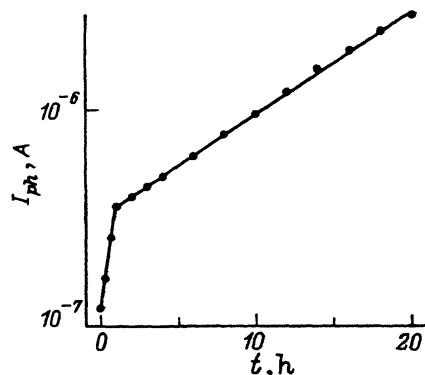


Рис. 4. Кинетика процесса восстановления исходной величины фототока при 300 К.

уменьшение заполнения глубоких электронных ловушек вследствие понижения уровня Ферми, что может быть обусловлено либо уменьшением концентрации мелких компенсирующих доноров, либо увеличением концентрации акцепторов. Выбор между этими двумя возможностями позволяет сделать анализ кривых ТСП (рис. 3).

В исследуемых кристаллах на кривых ТСП в области температур $80 \div 250$ К наблюдались три пика при $T_1 = 100$, $T_2 = 130$ и $T_3 = 170$ К. После ультразвуковой обработки все пики уменьшались по величине, однако уменьшение величины третьего пика соответствовало падению времени жизни свободных электронов (падению величины I_{ph} при температурах пика). В то же время изменение величины первого и второго пиков заметно превышало изменение I_{ph} . Это означает, что под действием ультразвука уменьшается концентрация соответствующих центров прилипания. Как показывают исследования, проведенные по методике, описанной в [8], оба этих центра при приложении электрического поля к кристаллу дрейфуют от анода к катоду, т. е. являются подвижными донорами. Таким образом, рост p_{ro} (уменьшение I_{ph}) в результате обработки обусловлен уменьшением концентрации мелких доноров. Энергии активации их диффузии, определенные из температурных зависимостей кинетики дрейфа [8], составляют ~ 0.4 eV для донора, ответственного за пик ТСП при $T \approx 100$ К, и ~ 0.3 eV для донора, ответственного за пик при $T \approx 130$ К.

Наблюдающиеся изменения характеристик кристаллов обратимы: первоначальное состояние полностью восстанавливается либо при прогреве до 400 К, либо при выдерживании в течение суток при 300 К. На кривой восстановления I_{ph} наблюдаются два участка с резко различающимися временами (рис. 4). Энергия активации процесса восстановления на первом и втором участке составляет 0.3 и 0.4 eV соответственно.

Приведенные выше результаты показывают, что под действием ультразвука происходит уменьшение концентрации мелких доноров. Эф-

фект обратимого уменьшения концентрации мелких доноров под действием синусоидального ультразвука в кристаллах CdS наблюдался ранее и связывался с уходом их на стоки — дислокации [1]. Предполагалось, что в процессе ультразвуковой обработки имеет место дрейф доноров в электрическом поле колеблющейся под действием ультразвука дислокации, в то время как восстановление исходного состояния кристалла происходит вследствие возвращения доноров из стоков в объем образца. Можно думать, что и в нашем случае имеют место подобные процессы. В [1], однако, и процесс собирания доноров на стоки, и процесс возвращения их в объем были активационными с примерно одинаковой энергией активации, равной энергии активации термической диффузии доноров, т.е. ультразвук существенно не влиял на характеристики диффузии дефектов. При этом время процесса собирания доноров на стоки составляло при 300 К десятки минут. Под действием импульсного ультразвука собирание доноров на стоки успевает произойти за время $\tau_{US} = 10^{-5}$ s как при 300, так и при 77 К. Это означает, что время протекания процесса $\tau \leq 10^{-5}$ s даже при 77 К. В то же время обратный процесс (отход доноров от стоков) протекает при 300 К за несколько часов с энергией активации диффузии доноров. Хотя вследствие выполнения условия $\tau \leq \tau_{US}$ установить наличие температурной зависимости τ не представляется возможным, столь малое значение времени протекания процесса при 77 К, а также большая разница во временах процессов собирания доноров и восстановления исходного состояния свидетельствуют, по-видимому, о безактивационном характере движения доноров под действием ультразвука. Механизм наблюдаемого эффекта будет исследован в дальнейшем.

Работа выполнялась при поддержке Фонда фундаментальных исследований Комитета по науке и технике при Кабинете министров Украины и Фонда Дж.Сороса.

Список литературы

- [1] Здебский А.П., Миронюк Н.В., Остапенко С.С., Савчук А.У., Шейнкман М.К. ФТП **20**, 10, 1861 (1986).
- [2] Заверюхин Б.Н., Кревчик В.Д., Муминов Р.А., Шамагдиев А.Ш. ФТП **20**, 3, 525 (1986).
- [3] Гаибов А.Г., Заверюхин Б.Н., Кревчик В.Д., Муминов Р.А., Нигманов О. Письма в ЖТФ **10**, 10, 616 (1984).
- [4] Ostapenko S.S., Jastrzebski L., Lagowski J., Sopori B. Appl. Phys. Lett. **65**, 12, 1555 (1994).
- [5] Buyanova I.A., Ostapenko S.S., Sheinkman M.K., Murrikov M. Semicond. Sci. Technol. **9**, 2, 158 (1994).
- [6] Янушкевич В.А. // Физ. и хим. обр. материалов, 5, 9 (1975).
- [7] Лашкарев В.Е., Любченко А.В., Шейнкман М.К. Неравновесные процессы в полупроводниках. Киев (1981). 264 с.
- [8] Корсунская Н.Е., Маркевич И.В., Торчинская Т.В., Шейнкман М.К. ФТП **13**, 3, 435 (1979).