

## ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТА УСТОЙЧИВОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В СЕЛЕКТИВНО ЛЕГИРОВАННЫХ ДВОЙНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ GaAs/*n*-(Al, Ga)As

Евтихий В. П., Кошнев П. С., Надточий М. Ю., Устинов В. М.

Исследована спектральная чувствительность эффекта устойчивой фотопроводимости (УФП) в двойных селективно легированных гетероструктурах GaAs/*n*-(Al, Ga)As. Показано существование двух механизмов, которые вносят вклад в УФП при низких температурах: 1) фотовозбуждение DX-центров в легированном кремнием (Al, Ga)As:Si, 2) генерация электронно-дырочных пар в нелегированном (Al, Ga)As с последующим их разделением полем области объемного заряда вблизи квантовой ямы.

Электрофизические свойства селективно легированных гетероструктур (СЛГС) GaAs/*n*-(Al, Ga)As могут существенно меняться при освещении. Так называемый эффект устойчивой фотопроводимости (УФП) проявляется при низких ( $T < 150$  К) температурах и заключается в увеличении проводимости двумерного канала при подсветке и сохранении ее в течение длительного времени после выключения освещения.

При исследовании эффекта УФП в одиночных СЛГС (ОСЛГС) GaAs/(Al, Ga)As [<sup>1-3</sup>] было показано существование двух различных механизмов, приводящих к увеличению концентрации электронов в канале. Один из них связан с фотоионизацией DX-центров в легированном кремнием (Al, Ga)As и переходом свободных электронов из широкозонного твердого раствора в канал, второй — с фотовозбуждением электронно-дырочных пар в объемном GaAs и последующим их разделением полем области объемного заряда вблизи гетероперехода со стороны GaAs. Вклады обоих механизмов в концентрацию в канале могут быть сопоставимыми, однако спектральная чувствительность различна. Максимум фотопоглощения DX-центров приходится на  $h\nu \sim 1$  эВ [<sup>3</sup>], а фотовозбуждение электронно-дырочных пар в GaAs начинается при  $h\nu > E_{g\text{GaAs}} = 1.5$  эВ ( $T = 4.2$  К).

Нам исследовался эффект УФП в двойной СЛГС (ДСЛГС) GaAs/*n*-(Al, Ga)As. Структура была изготовлена методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) [<sup>4</sup>] и представляла собой GaAs квантовую яму шириной 250 Å, ограниченную с обеих сторон барьерами Al<sub>0.26</sub>Ga<sub>0.74</sub>As толщиной по 2000 Å каждый. Часть барьера со стороны «прямого» интерфейса [<sup>5</sup>] толщиной 500 Å, отстоящая от ямы на 400 Å, была легирована кремнием до уровня  $\sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Проводились исследования эффекта Холла и осцилляций Шубникова—де-Гааза (ОШГ) на образце в форме холловского мостика при  $T = 4.2$  К. Концентрация электронов в структуре изменялась импульсной подсветкой, которая производилась через оптическое волокно тремя типами источников: GaAs СИД ( $h\nu \sim 1.4$  эВ), зеленым GaP СИД ( $h\nu \sim 2.4$  эВ) и белым светом со сплошным спектром (лампа накаливания). Такой выбор источников позволил нам разделить различные механизмы УФП. Для исключения влияния процессов нестационарной фотопроводимости измерения проводились через 1 мин после окончания импульса подсветки.

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости холловской подвижности от холловской концентрации (n<sub>H</sub>), полученные при освещении образца различными источниками света. Стрелками показаны концентрации носителей в двумерном канале (n<sub>2D</sub>), определенные из ОШГ. Видно, что характер кривых при освещении образца GaAs и GaP СИД существенно различается. В случае GaP СИД подвижность носителей резко растет с концентрацией, причем n<sub>H</sub> практически совпадает с n<sub>2D</sub>, что говорит об отсутствии шунтировки двумерного канала другими проводящими слоями. При освещении же GaAs СИД подвижность (за исключением начального участка) меняется слабо, причем появляется значительное (в 1.5 раза) расхождение между n<sub>H</sub> и n<sub>2D</sub>. Это указывает на появле-

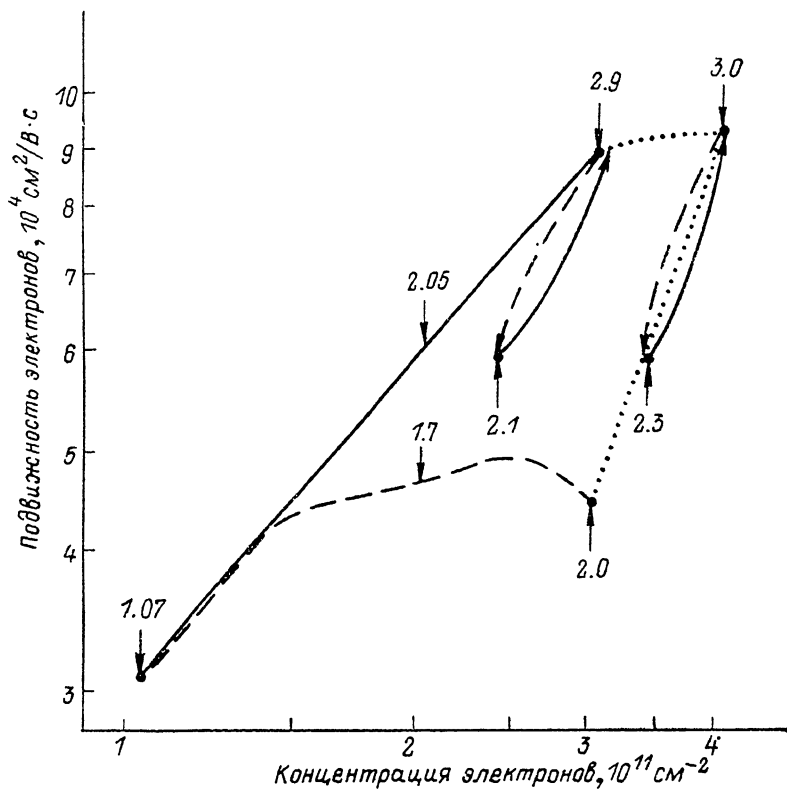


Рис. 1. Зависимость холловской подвижности от холловской концентрации в условиях УФП при освещении образца различными источниками света.

Сплошная линия — зеленый GaP СИД, штриховые — GaAs СИД, точечные — белый свет. Цифры над стрелками — значения двумерной концентрации в соответствующих точках, определенные по ОШГ. T = 4.2 К.

ние шунтирующей двумерный канал проводимости, однако простая модель двухслойной проводимости [2] не позволяет объяснить столь большую разницу в холловских подвижностях в случае освещения образца GaAs и GaP СИД.

Освещение предварительно засвеченного до насыщения УФП GaAs или GaP СИД образца белым светом приводит к дальнейшему росту n<sub>H</sub>, однако в первом случае этот рост сопровождается значительным повышением подвижности и концентрации в канале, а во втором приводит лишь к появлению заметной шунтирующей проводимости. В обоих случаях конечные значения измеряемых параметров оказываются одинаковыми. Наконец, освещение GaAs СИД образца, предварительно экспонированного GaP СИД или белым светом, приводит к падению подвижности и концентрации (как n<sub>H</sub>, так и n<sub>2D</sub>). Однако удается практически полностью восстановить параметры структуры, осветив ее GaP СИД.

Аналогичные эксперименты были нами проделаны в ОСЛГС GaAs/n-(Al, Ga)As, однако заметных различий в зависимостях подвижности от концентрации при освещении GaP и GaAs СИД замечено не было.

Для объяснения указанных экспериментальных особенностей эффекта УФП в ДСЛГС предлагается учитывать два механизма, приводящих к увеличению концентрации электронов в канале, один из которых связан с фотоионизацией  $DX$ -центров, а второй — с разделением полем гетероперехода фотовозбужденных электронно-дырочных пар, но не в GaAs, как в ОСЛГС, а в слое твердого раствора (Al, Ga)As со стороны нелегированного барьера квантовой ямы

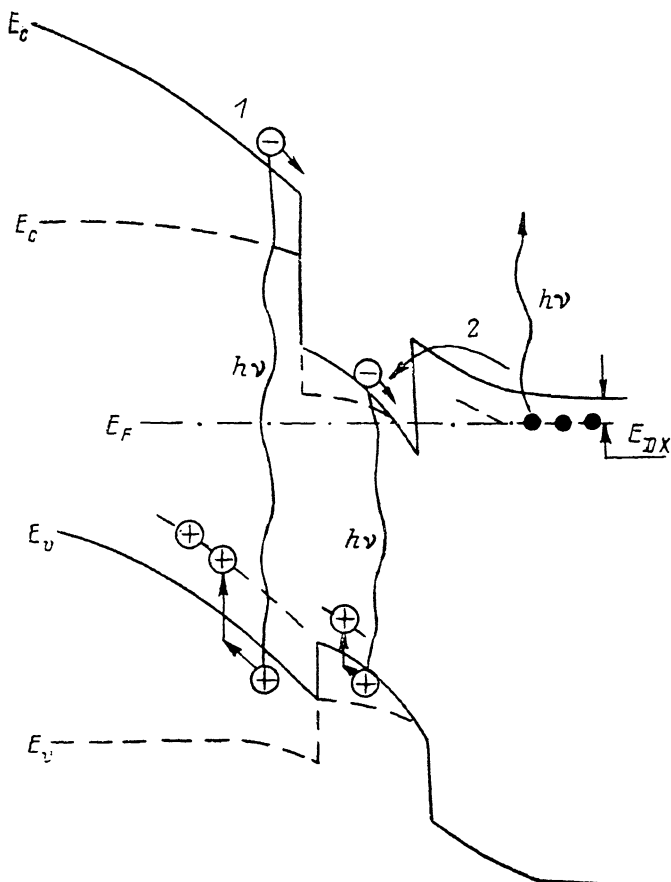


Рис. 2. Схематическое изображение процессов, приводящих к увеличению концентрации двумерных электронов в селективно легированных двойных гетероструктурах под воздействием освещения при низких температурах.

1 — фотовозбуждение электронно-дырочных пар в слое твердого раствора (Al, Ga)As со стороны нелегированного барьера квантовой ямы с последующим их разделением полем области объемного заряда; 2 — фотоионизация  $DX$ -центров с переходом электронов в двумерный канал.

(рис. 2). В этом случае электроны полем будут подтягиваться к яме и захватываться в нее, а дырки будут рекомбинировать с ионизированными в отсутствие освещения акцепторами, которые обычно являются фоновой примесью в специально не легированном МПЭ AlGaAs. Прирост концентрации двумерных носителей в этом случае будет зависеть от уровня фонового легирования твердого раствора и может составлять  $n \sim 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  при толщине барьера 2000 Å и уровне остаточного легирования  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , характерного для исследуемой структуры. Помимо увеличения концентрации электронов в канале такой процесс должен также приводить к повышению их подвижности вследствие нейтрализации заряженных центров в барьере, ответственных за один из основных механизмов рассеяния в СЛГС [6]. Порог fotocувствительности в этом случае будет при  $h\nu = E_g \sim 1.9 \text{ эВ}$  для данного состава твердого раствора и больше энергии кванта GaAs СИД. Подобный процесс в GaAs в исследованной структуре не играет роли вследствие узости квантовой ямы.

Таким образом, освещение ДСЛГС GaAs СИД приводит к увеличению концентрации носителей в канале лишь за счет фотоионизации  $DХ$ -центров в  $(Al, Ga)As$ , а при большой экспозиции и к появлению проводимости по слою легированного  $(Al, Ga)As$ , шунтирующей двумерный канал. При использовании же GaP СИД рост двумерной концентрации происходит в значительной мере за счет разделения носителей полем гетероперехода и сопровождается уменьшением количества рассеивающих центров вблизи канала. Конечные значения подвижности и концентрации в этом случае будут значительно выше, а расхождение между  $n_H$  и  $n_{2D}$  значительно меньше из-за лучшей проводимости канала.

Освещение GaAs СИД образца, предварительно экспонированного GaP СИД или белым светом, приводит к падению подвижности, уменьшению  $n_H$ ,  $n_{2D}$  и увеличению различий между ними. Этот эффект может быть связан с фото-выбросом электронов из канала в твердый раствор и их рекомбинацией там с нейтральными акцепторами. Однако возникающее при этом электрическое поле препятствует такому процессу и не дает удалить из канала все электроны, попавшие туда со стороны нелегированного барьера. Рекомбинации же электронов с  $DХ$ -центрами мешает барьер микроскопической природы [7]. Предложенную интерпретацию подтверждает тот факт, что последующее освещение образца светом с  $h\nu > E_g$  барьера вновь нейтрализует акцепторы и восстанавливает характеристики структуры. Различие между  $n_H$  и  $n_{2D}$  после освещения образца GaAs СИД указывает на то, что проводимость двумерного канала из-за уменьшения  $n_{2D}$  и подвижности падает до значений, сравнимых с проводимостью шунтирующего слоя  $AlGaAs : Si$ , который начинает оказывать влияние на результаты холловских измерений.

Освещение белым светом приводит к состоянию с высокими подвижностью, концентрацией и шунтировкой. По нашему мнению, при этом действуют оба рассмотренных механизма роста концентрации электронов, причем степень ионизации  $DХ$ -центров белым светом, по-видимому, выше, чем GaAs СИД. Это может быть связано со специфической фоточувствительностью  $DХ$ -центров либо с существованием центров с разными характеристиками.

Таким образом, в ДСЛГС GaAs/ $n$ -(Al, Ga)As существуют два различных механизма, ответственных за наблюдаемый при низких температурах эффект УФП, а именно: 1) фотовозбуждение  $DХ$ -центров в легированном слое (Al, Ga)As, 2) генерация электронно-дырочных пар в нелегированном (Al, Ga)As с последующим их разделением полем гетероперехода. Эти механизмы имеют различную спектральную фоточувствительность, причем освещение структуры светом с  $h\nu > E_g$  барьера приводит к резкому возрастанию подвижности вследствие нейтрализации ионизированных фоновых примесей в (Al, Ga)As.

#### Список литературы

- [1] Stormer H. L., Dingle R., Gossard A. C., Wiegmann W., Sturge M. D. // Sol. St. Commun. 1979. V. 29. N 10. P. 705—709.
- [2] Kastalsky A., Hwang J. C. M. // Sol. St. Commun. 1984. V. 51. N 5. P. 317—322.
- [3] Schubert E. F., Fischer A., Ploog K. // Phys. Rev. B. 1985. V. 31. N 12. P. 7937—7946.
- [4] Алфёров Ж. И., Гарбузов Д. З., Денисов А. Г., Евтихийев В. П., Комиссаров А. Б., Сеичкин А. П., Скороходов В. М., Токранов В. Е. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 12. С. 2012—2016.
- [5] Sasa S., Saito J., Nanbu K., Ishikawa T., Hiyamizu S. // Japan. J. Appl. Phys. 1984. V. 23. N 8. P. L573—L575.
- [6] Алфёров Ж. И., Иванов С. В., Копьев П. С., Мельцер Б. Я., Полянская Т. А., Савельев И. Г., Устинов В. М., Шмарцев Ю. В. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 7. С. 1199—1203.
- [7] He L. X., Martin K. P., Higgins R. J. // Phys. Rev. B. 1987. V. 36. N 12. P. 6508—6519.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Получена 29.11.1988  
Принята к печати 17.01.1989