

06.2;06.3;12

Особенности долговременной релаксации фотоэдс в гетероэпитаксиальной структуре ZnSe–GaAs

© Л.В. Шеховцов, Е.Ф. Венгер, Г.Н. Семенова, Ю.Г. Садофьев,
Н.Е. Корсунская, М.П. Семцов, С.Ю. Сапко

Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев
Физический институт РАН, Москва

Поступило в Редакцию 6 августа 1999 г.

Исследованы спектральные характеристики и распределение поперечной фотоэдс в образцах гетероэпитаксиальной структуры ZnSe–GaAs, полученной методом молекулярно-лучевой эпитаксии на поверхности (100) подложки GaAs, стабилизированной цинком.

При измерениях спектральных характеристик обнаружено нетрадиционное проявление эффекта долговременной релаксации фотоэдс: амплитуда ее спектральной характеристики зависит от направления изменения длины волны возбуждающего монохроматического света.

Обнаруженную зависимость амплитуды и знака (фазы) фотоэдс от интенсивности поглощаемого в образце света можно объяснить изменением эффективного времени жизни электронно-дырочных пар, а также его разной величиной в различных слоях гетероструктуры.

Показано, что градиенты удельного сопротивления в гетероструктуре вблизи границы раздела имеют слоистый характер.

1. Гетероструктуры ZnSe–GaAs, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии, имеют важное приборное значение. В частности, они могут являться основой изготовления структур для синие-зеленых лазеров [1]. Исследование однородности таких структур, особенно в области их границы раздела, является актуальной задачей. Одной из методик, которая позволяет определить наличие неоднородности легирования примесями или неоднородности величины времени жизни носителей зарядов, является исследование распределения объемно-градиентной фотоэдс и ее спектральной характеристики [2–4].

Как известно, в пленках ZnSe, выращенных на подложках GaAs, присутствуют механические напряжения, связанные с рассогласованием

параметров решетки и различием коэффициентов термического расширения [5]. Релаксация этих напряжений приводит к возникновению дислокаций, неоднородно распределенных в пленке и подложке вблизи их границы раздела. При этом происходит и изменение рекомбинационных параметров в этих областях гетероструктуры. Кроме того, в приграничную область и в объем пленки ZnSe в процессе роста происходит диффузия примесей из приповерхностного слоя подложки, которые определяют удельное сопротивление выращенной пленки. Внедренные примеси также могут быть распределены в объеме неоднородно.

Методика измерения объемно-градиентной фотоэдс, при которой используется движение монохроматического светового зонда вдоль границы раздела гетероструктуры типа ZnSe–GaAs, а также измерение спектральных характеристик этой эдс позволяют получить трехмерную картину распределения примесей или времени жизни неравновесных носителей заряда.

2. Исследованные образцы гетероструктуры ZnSe–GaAs имеют следующие характеристики: толщина высокоомной пленки ZnSe — $2\ \mu\text{m}$; подложка GaAs — полуизолирующая, толщина — $300\ \mu\text{m}$. Длина образцов составляла $15\ \text{mm}$, ширина — $3\ \text{mm}$. Измерения проводились при температуре $300\ \text{K}$.

На рис. 1 (кривая 1) приведена спектральная характеристика поперечной фотоэдс гетероструктуры ZnSe–GaAs, измеренная при интенсивности света $G = 1 \cdot 10^{14}\ \text{quanta/cm}^2 \cdot \text{s}$ во всем исследованном диапазоне длин волн возбуждающего света. При этом соблюдались предосторожности, необходимые при фотоэлектрических измерениях: затемнение контактов во избежание генерации вентильной фотоэдс, длина освещаемой части образца — $5\ \text{mm}$. Освещение осуществлялось модулированным на частоте $536\ \text{Hz}$ монохроматическим светом, падающим на образец по нормали со стороны пленки ZnSe. Эдс измерялась в направлении, параллельном освещаемой поверхности.

На спектральной характеристике выделяются характерные максимумы эдс при $\lambda = 0.465\ \mu\text{m}$ ($h\nu = 2.67\ \text{eV}$) и $\lambda = 0.885\ \mu\text{m}$ ($h\nu = 1.40\ \text{eV}$), которые соответствуют краям поглощения ZnSe и GaAs. Кроме того, наблюдаются пологие максимумы в области длины волны $0.5 \div 0.7\ \mu\text{m}$, которые могут быть связаны с периодическим изменением величины градиента удельного сопротивления по глубине образца гетероструктуры.

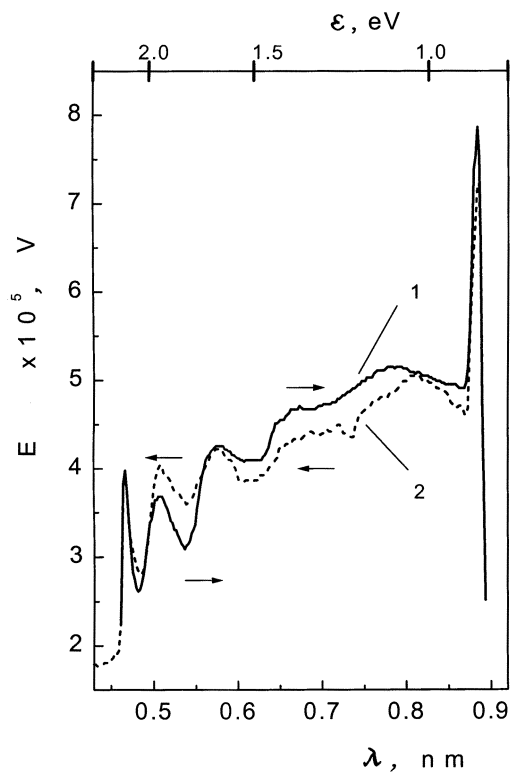


Рис. 1. Спектральная характеристика поперечной фотоэдс (E) в гетероструктуре ZnSe–GaAs при сканировании длины волны монохроматического света в сторону ее увеличения от 0.4 до 0.9 μm (1) и в сторону уменьшения (2). Интенсивность возбуждающего света $G = 1 \cdot 10^{14}$ quanta/cm² · s.

На рис. 2 приведены кривые распределения объемно-градиентной фотоэдс, измеренные при движении монохроматического светового зонда в направлении от одного контакта к другому в пределах длины того же участка образца, который освещался при измерениях спектральных характеристик. Кривая 1 соответствует длине волны возбуждающего света $\lambda = 0.440 \mu\text{m}$ ($h\nu = 2.82 \text{ eV}$); кривые 2, 3 — $\lambda = 0.885 \mu\text{m}$ ($h\nu = 1.40 \text{ eV}$). Ширина светового зонда составляла

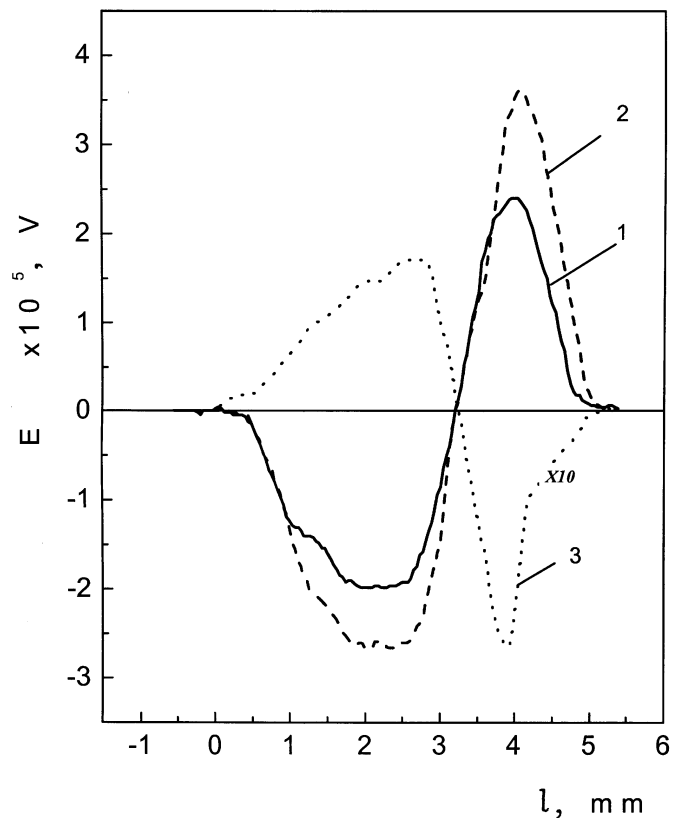


Рис. 2. Распределение поперечной фотоэдс в гетероструктуре ZnSe–GaAs при движении светового зонда вдоль поверхности образца (l), освещение осуществлялось модулированным светом со стороны эпитаксиального слоя ZnSe: 1 — $\lambda = 0.44 \mu\text{m}$, $G = 2 \cdot 10^{12} \text{ quanta/cm}^2 \cdot \text{s}$; 2 — $\lambda = 0.88 \mu\text{m}$, $G = 2 \cdot 10^{12} \text{ quanta/cm}^2 \cdot \text{s}$; 3 — $\lambda = 0.88 \mu\text{m}$, $G = 2 \cdot 10^{14} \text{ quanta/cm}^2 \cdot \text{s}$.

0.3 mm, скорость движения — 0.025 mm/s. Кривые 1, 2 измерялись при интенсивности $G = 2 \cdot 10^{12} \text{ quanta/cm}^2 \cdot \text{s}$, кривая 3 — при интенсивности $G = 2 \cdot 10^{14} \text{ quanta/cm}^2 \cdot \text{s}$. Как видно из рисунка, распределение поперечной фотоэдс вдоль образца, измерение при длине

волны возбуждающего света $\lambda = 0.440 \mu\text{m}$ и $\lambda = 0.885 \mu\text{m}$ (кривые 1 и 2 соответственно) изменяется мало и кривые близки друг к другу. Однако увеличение интенсивности света до $G = 2 \cdot 10^{14} \text{ quanta/cm}^2 \cdot \text{s}$ приводит к увеличению амплитуды фотоэдс в 10 раз и к инверсии ее распределения на длине волны $\lambda = 0.885 \mu\text{m}$ (кривые 2 и 3). Такое же изменение интенсивности света при длине волны $\lambda = 0.440 \mu\text{m}$ не приводит к последнему из указанных эффектов.

3. Важно отметить, что измерение знакопеременного распределения фотоэдс (рис. 2) производилось с использованием метода синхронного детектирования, в то время как ее спектральная характеристика (рис. 1) измерялась без синхронного детектирования. Поэтому изменение знака фотоэдс при измерениях спектральной характеристики на длине волны $\lambda = 0.885 \mu\text{m}$ не могло быть зарегистрировано, хотя интенсивность модулированного света составляла $G = 1 \cdot 10^{14} \text{ quanta/cm}^2 \cdot \text{s}$.

Известно, что изменение знака сигнала на противоположный при синхронном детектировании соответствует изменению фазы сигнала на 180° . Первопричиной такой смены знака является изменение направления градиента концентрации легирующей примеси в образце. Но характерно, что на эксперименте происходит плавное изменение фазы сигнала на длине волны модулированного света $\lambda = 0.885 \mu\text{m}$ при увеличении интенсивности света G от величины $2 \cdot 10^{12}$ до $2 \cdot 10^{14} \text{ quanta/cm}^2 \cdot \text{s}$.

Интерпретацию полученных результатов можно провести в рамках известных представлений о рекомбинационно-дрейфовых барьерах, которые возникают в сильно неоднородных полупроводниковых кристаллах [6].

Определенной амплитуде и фазе измеряемого на опыте сигнала фотоэдс соответствует некое эффективное время жизни электронно-дырочных пар в исследуемом полупроводнике. Изменение амплитуды и знака (фазы) сигнала в зависимости от длины волны зондирующего монохроматического излучения и соответственно коэффициента поглощения света означает изменение эффективного времени жизни по глубине образца, что может быть вызвано изменением высоты рекомбинационно-дрейфовых барьеров в гетероструктуре. Другими словами, это указывает на сильную неоднородность гетероструктуры ZnSe–GaAs, ее "слоистость" в областях пленки и подложки, которые прилегают к гетерогранице. Этот вывод подтверждается и наличием выраженных максимумов фотоэдс в области длины волны $0.5\text{--}0.7 \mu\text{m}$ на ее спектральной характеристике (рис. 1).

Выражение для времени релаксации ($\tau = \tau_0 \exp(\varphi)$) неравновесной концентрации электронно-дырочных пар при фотовозбуждении состоит из двух сомножителей, где τ_0 — время жизни электронно-дырочных пар в отсутствие рекомбинационных барьеров в образце, $\varphi = E_{rec}/kT$, E_{rec} — высота барьеров [6]. Изменение амплитуды и знака измеряемой фотоэдс может быть связано с изменением как τ_0 по глубине образца, так и высоты релаксационных барьеров. В случае гетероструктуры ZnSe–GaAs возможно одновременное изменение обоих указанных параметров. Уточнение природы наблюдаемой слоистости явится предметом дальнейших исследований с использованием методики одновременного возбуждения полупроводника модулированным и немодулированным монохроматическим излучением [4,8].

4. Наличие рекомбинационно-дрейфовых барьеров в полупроводнике или полупроводниковой структуре должно приводить к эффекту долговременной релаксации фотоэдс [6,7]. И действительно, если спектральную характеристику поперечной фотоэдс измерить дважды: непрерывно изменяя длину волны возбуждающего монохроматического света (и соответственно глубину проникновения) от длины волны $\lambda = 0.4 \mu\text{m}$ до $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ (рис. 1, кривая 1), а затем в обратную сторону (рис. 1, кривая 2), то видно, что амплитуда фотоэдс для каждого значения λ зависит от скорости изменения длины волны возбуждающего света (соответственно его коэффициента и глубине поглощения в образце) и направления изменения длины волны от $\lambda = 0.4 \mu\text{m}$ в сторону увеличения или от $\lambda = 0.9 \mu\text{m}$ в сторону уменьшения. В данном случае наблюдается своеобразное проявление эффекта долговременной релаксации фотоэдс.

Если монохроматический световой зонд движется вдоль образца по направлению от контакта к контакту, то вследствие долговременной релаксации возникает дополнительная эдс, которая алгебраически складывается с объемно-градиентной [4,8]. В случае же движения "фронта" поглощаемого света в глубину образца аналогичная эдс возникает в направлении его движения, т.е. от освещаемой поверхности к тыльной, темновой, поверхности, и ее знак также меняется в зависимости от направления движения "фронта" света. Вследствие наличия составляющей градиента удельного сопротивления, направленной вдоль освещаемой поверхности, на контактах образца кроме основной объемно-градиентной фотоэдс возникает составляющая эдс, связанная

с релаксацией концентрации неравновесных носителей, распределенных по глубине, вдоль направления их диффузии.

5. Необходимо сделать важное замечание по поводу методики измерения спектральных характеристик поперечной фотоэдс, представленных на рис. 1. Величина разности их амплитуд зависит от скорости изменения длины волны возбуждающего света в процессе измерения. Измеряемый на опыте сигнал является алгебраической суммой объемно-градиентной эдс и эдс, связанной с градиентом неравновесных электронно-дырочных пар, который возникает вдоль направления движения "фронта" света, т.е. по глубине образца. Соответственно при увеличении скорости этого движения увеличивается амплитуда второй из указанных эдс и ее вклад в измеряемый сигнал.

6. Исследование спектральной характеристики поперечной фотоэдс и ее пространственного распределения позволяет сделать следующие выводы.

В гетероэпитаксиальной структуре ZnSe–GaAs обнаружено нетрадиционное проявление эффекта долговременной релаксации поперечной фотоэдс. Этот эффект проявляется при измерении спектральных характеристик в условиях непрерывного изменения глубины поглощения возбуждающего света в образце.

На спектральной характеристике фотоэдс наблюдается ряд выраженных максимумов как в области края фундаментального поглощения ZnSe ($\lambda = 0.465 \mu\text{m}$, $h\nu = 2.62 \text{ eV}$) и GaAs ($\lambda = 0.890 \mu\text{m}$, $h\nu = 1.40 \text{ eV}$), так и при энергиях квантов возбуждающего света, лежащих между ними. Это указывает на изменение составляющих градиентов удельного сопротивления по глубине структуры, т.е. на ее "слоистость".

Изменение амплитуды и знака фотоэдс в зависимости от интенсивности возбуждающего света связано, по-видимому, с изменением при этом "эффективного" времени жизни электронно-дырочных пар, а также его разной величиной в слоях образца гетероструктуры, прилегающих к границе раздела.

Выполнение работы частично финансировалось Государственным фондом фундаментальных исследований, грант № 2.4.–362–98 и грант № 2.4.–621–98.

Список литературы

- [1] *Иванов С.В., Торопов А.А., Сорокин С.В.* и др. // ФТП. 1998. Т. 32. В. 10. С. 1272–1276.
- [2] *Тауц Я.* Фото- и термоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Иностран. лит., 1962. 265 с.
- [3] *Баев И.В., Валяшко Е.Г.* // ФТТ. 1965. Т. 7. В. 9. С. 2585–2593.
- [4] *Шеховцов Л.В., Саченко А.В., Шварц Ю.М.* // ФТП. 1995. Т. 29. С. 566–574.
- [5] *Коваленко А.В., Мекекечко А.Ю.* // ФТТ. 1993. Т. 35. В. 10. С. 2852–2853.
- [6] *Шейнкман М.К., Шик А.Я.* // ФТП. 1976. Т. 10. В. 2. С. 209–233.
- [7] *Вавилов В.С., Эфимиу П.К., Зардас Дж.Е.* // УФН. 1999. Т. 169. С. 209–212.
- [8] *Шеховцов Л.В., Семенова Г.Н., Венгер Е.Ф., Саченко А.В., Садосфьев Ю.Г.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 11. С. 34–41.