

06.2;06.3;12

## Долговременная релаксация фотоэдс в гетероэпитаксиальной структуре

© Л.В. Шеховцов, Г.Н. Семенова, Е.Ф. Венгер,  
А.В. Саченко, Ю.Г. Садофьев

Институт физики полупроводников НАН Украины, Киев,  
Научно-исследовательский технологический институт, Рязань

Поступило в Редакцию 17 декабря 1996 г.

В работе исследовано распределение поперечной фотоэдс в образцах гетероструктуры Ge–GaAs со слоем оксида ( $\sim 15 \text{ \AA}$ ) на границе раздела. С помощью методики одновременного возбуждения модулированным и не модулированным излучением обнаружена долговременная релаксация фотоэдс в гетероструктурах. Энергетические барьеры, которые обуславливают этот эффект, локализованы на поверхности пленки Ge и подложки GaAs, прилегающих к окислу, расположенному между ними.

Показано, что градиенты темновой концентрации носителей тока в пленке и подложке направлены в противоположные стороны. Переходной слой формируется в процессе роста, а не вследствие классической гетеродиффузии компонент в пленке и подложке.

Отмечена необходимость учета вклада в регистрируемый сигнал напряжения фотопроводимости, возникающей на частоте модуляции в поле, которое появляется на образце вследствие немодулированной подсветки.

1. Исследования спектральных характеристик поперечной фотоэдс, возникающей в гетероэпитаксиальной структуре Ge–GaAs при ее освещении монохроматическим светом в области фундаментального поглощения Ge и GaAs, дали результаты, которые позволили по новому взглянуть на процессы формирования свойств тонких пленок и переходных слоев при различных методах их выращивания [1–2].

Прежде всего оказалось, что в пленке Ge и в подложке GaAs имеются градиенты темновой концентрации носителей заряда, направленные вдоль границы раздела в противоположные стороны. На это указывали спектральные характеристики образцов гетероструктур, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии и термическим испарением в вакууме. Кроме того, выяснилось, что в образцах гетероструктур, выра-

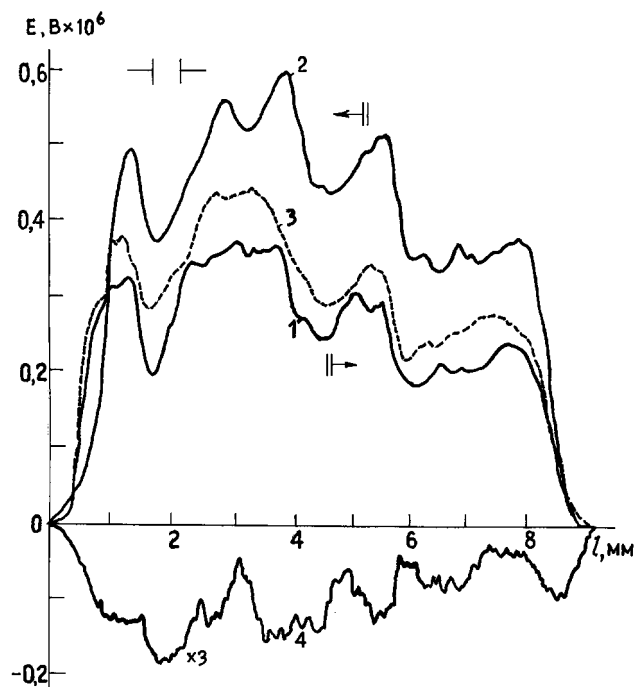
щенных термическим испарением в вакууме, имеется система дрейфовых и рекомбинационных барьеров, которые возникают вследствие перекрестного легирования пленки и подложки в процессе выращивания. Эти барьеры являются причиной немонотонной зависимости амплитуды фотоэдс от интенсивности возбуждающего света и ее долговременной релаксации.

На образцах гетероструктур, выращенных термическим испарением в вакууме и молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках GaAs с поверхностью, стабилизированной мышьяком, поперечная эдс имела амплитуду, достаточную для ее надежной регистрации. На образцах, полученных молекулярно-лучевой эпитаксией со слоем оксида на подложке, амплитуда эдс при используемых интенсивностях света ( $I = 10^{14}$  кв/см<sup>2</sup> · с) была мала и пришлось отказаться от измерений ее спектральных характеристик.

На исследование свойств таких гетероструктур представляет наибольший интерес с технологической точки зрения. Нанесение перед эпитаксией буферного оксидного слоя на подложку должно приводить к тому, что выращенные пленки Ge будут более чистыми и однородными, т. е. взаимное влияние подложки и пленки в этом отношении будет сведено к минимуму. Попытка выяснить с помощью исследования свойств поперечной фотоэдс, так ли это на самом деле, и предпринята в этой работе.

2. Исследовались образцы гетероструктур с линейными размерами  $12 \times 2 \times 0.3$  мм, которые обычно необходимо выдержать при фотоэлектрических измерениях [2]. Как указывалось выше, на подложки GaAs наносился тонкий ( $\sim 15\text{\AA}$ ) слой оксидов и производилось выращивание пленки Ge толщиной  $d = 0.5$  мкм *p*-типа проводимости с концентрацией  $(5-7) \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Технология получения таких структур методом молекулярно-лучевой эпитаксии подробно описана ранее [2,3].

Измерялось распределение вдоль образца поперечной фотоэдс, которая генерировалась при движении модулированного монохроматического светового зонда шириной 0.5 мм вдоль образца. Применение узкого светового зонда позволило увеличить интенсивность света, падающего на единицу площади образца, до  $6 \cdot 10^5$  см<sup>2</sup> · с и тем самым повысить амплитуду измеряемой на опыте фотоэдс. При проведении экспериментов имелась возможность изменять направление движения зонда на противоположное и его скорость в пределах 0.01–0.025 мм/с, варьировать длину волны модулированного ( $\lambda \sim$ ) и немодулированного



**Рис. 1.** Распределение поперечной фотоэдс в образце при движении зонда в противоположные стороны (освещение со стороны пленки Ge): 1, 2 —  $\lambda^{\sim} = 0.88$  мкм (в отсутствие подсветки); 3 —  $\lambda^{\sim} = 0.88$  мкм, подсветка  $\lambda^{-} = 0.86$  мкм; 4 —  $\lambda^{\sim} = 0.91$  мкм, подсветка  $\lambda^{-} = 0.86$  мкм.

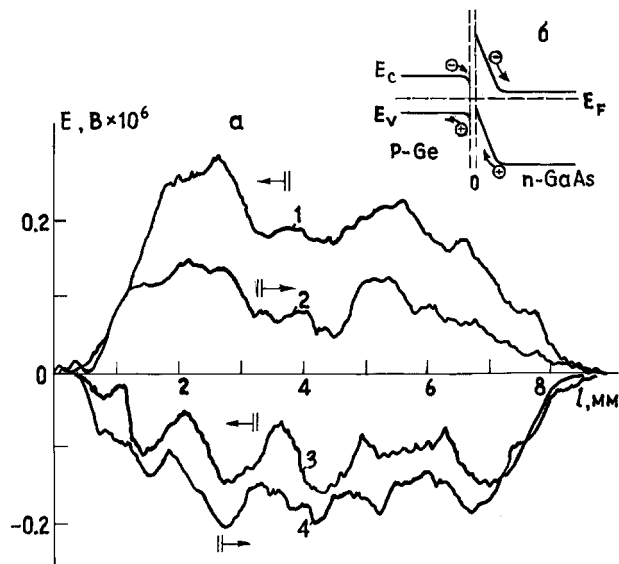
света ( $\lambda^{-}$ ), падающего на образец, в диапазоне 0.4–2.0 мкм, а также его интенсивность в пределах  $2 \cdot 10^{13}$ – $1 \cdot 10^{16}$  кв/см<sup>2</sup> · с.

3. Характерной особенностью исследуемых кривых распределения фотоэдс является зависимость их амплитуды от направления движения зонда, которая проявляется в отсутствие дополнительной немодулированной подсветки (кривые 1, 2, рис. 1, интенсивность света в зонде составляла  $6 \cdot 10^{15}$  кв/см<sup>2</sup> · с). Особенно наглядно эта зависимость видна на распределении эдс, генерируемой светом вблизи края поглощения GaAs ( $\lambda = 0.88$  мкм). При этом отличие между кривыми распределения эдс, соответствующих противоположным направлениям движения

зонда, уменьшается как при уменьшении длины волны света вплоть до 0.68 мкм, так и при ее увеличении вплоть до  $\lambda \geq 0.38$  мкм. Физические причины, которые приводят к такому отличию, известны и описаны в литературе [4,5]. Они связаны с наличием долговременной релаксации остаточной проводимости, возникающей в освещенном участке образца, и обусловлены рекомбинационно-дрейфовыми барьерами для неравновесных носителей, которые могут локализоваться на поверхности или в объеме полупроводника. В данном случае описанные выше особенности в характере распределения эдс указывают на то, что рекомбинационно-дрейфовые барьеры, ответственные за долговременную релаксацию эдс, локализованы в подложке GaAs, точнее в слое, непосредственно прилегающем к пленке Ge. Характерно, что на образцах гетероструктур, выращенных на подложках без оксидов на поверхности, эти особенности отсутствуют.

4. Кривые 3 и 4 на рис. 1 представляют собой распределения фотоэдс вдоль образца при его одновременном освещении модулированным и немодулированным светом со стороны пленки германия. Весь образец освещался немодулированным светом с  $\lambda^- = 0.86$  мкм и интенсивностью  $N = 4.1 \cdot 10^{15}$  кв/см<sup>2</sup> · с. Вдоль образца с затемненными контактами от одного его конца к другому со скоростью 0.025 мм/с световой зонд модулированного света с  $\lambda^{\sim} = 0.88$  мкм (кривая 3, рис. 1). Характер распределения эдс не изменялся при изменении направления движения светового зонда. Однако изменение длины волны возбуждающего модулированного излучения на  $\lambda^{\sim} = 0.91$  приводило к изменению как вида распределения эдс, так и ее знака (кривая 4, рис. 1). Зависимость распределения эдс от направления движения зонда также отсутствовала. Ясно, что эдс, соответствующая кривой 4, генерируется в пленке Ge, так как энергия квантов возбуждающего света уже меньше ширины запрещенной зоны GaAs. В это же время кривая 1 описывает распределение эдс, которая генерируется преимущественно в GaAs, так как ее амплитуда в Ge на порядок меньше и вклад ее в суммарную эдс мал.

Ранее уже указывалось на то, что механизм возникновения фотоэдс связан с наличием градиентов удельного темнового сопротивления в пленке и подложке. Изменение знака эдс при выходе длины волны возбуждающего света за край поглощения GaAs является прямым указанием на то, что эти градиенты в пленке и подложке направлены в противоположные стороны. Такой вывод был сделан ранее на основе



**Рис. 2.** Распределение поперечной фотоэдс в образце (освещение со стороны подложки GaAs): 1, 2 —  $\lambda \sim 0.88$  мкм; 3, 4 —  $\lambda \sim 0.91$  мкм.

анализа спектральных характеристик поперечной фотоэдс, измеренных на образцах гетероструктур, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией, на стабилизированной мышьяком поверхности подложки GaAs (без слоя оксидов) и термическим испарением в вакууме.

Интересно, что при уменьшении  $\lambda$  (соответственно увеличении энергии квантов возбуждающего света и коэффициента поглощения света в Ge) характер распределения эдс меняется, так как она является по существу алгебраической суммой эдс, возникающих в пленке и подложке. Кроме того, амплитуды этих эдс выравниваются вследствие падения доли света, проходящего сквозь пленку Ge и поглощаемого подложкой  $I = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot d)$  и, естественно, меняется их вклад в измеряемый сигнал.

5. Дополнительные данные, указывающие на локализацию барьеров, получены при исследовании распределения фотоэдс в случае освещения образца гетероструктуры со стороны подложки GaAs (рис. 2, а). Эти ис-

следования показали, что, во-первых, наблюдается изменение знака эдс при изменении длины волны модулированного света с  $\lambda \sim 0.88$  мкм (кривые 3, 4, рис. 2, а) на 0.91 мкм (кривые 1, 2, рис. 2, а), как и в случае освещения со стороны пленки в Ge; во-вторых, подсветка также приводит к исчезновению эффекта долговременной релаксации эдс и проявляется селективность ее воздействия на измеренный сигнал.

По сравнению с освещением со стороны пленки амплитуда эдс возрастает при длине волны  $\lambda = 0.91$  мкм в пять раз, а эдс, генерируемая светом с  $\lambda = 0.88$  мкм, падает в три раза, что в первую очередь связано с увеличением части поглощаемого света в пленке Ge и уменьшением ее в подложке GaAs вблизи их границы раздела [6–8]. При этом необходимо подчеркнуть, что основная часть амплитуды фотоэдс формируется именно здесь.

6. Исследуемые образцы гетероструктур имеют слой окисла между пленкой и подложкой, который изменяет зонную диаграмму гетероперехода. Эта модель предполагает возникновение слоя обеднения (вплоть до инверсии) в GaAs на границе со слоем оксида и с другой стороны — слоя обогащения или обеднения в Ge (рис. 2, б) [9]. Окисел является естественным барьером для носителей заряда между пленкой и подложкой. Генерированные светом электронно-дырочные пары пространственно разделяются в области изгиба зон в GaAs и в Ge соответственно. При этом окисел частично препятствует переходу избыточных носителей из подложки в пленку. Такое пространственное разделение неравновесных носителей заряда и является причиной возникновения дополнительной, наряду с объемно-градиентной, эдс при движении светового зонда вдоль границы раздела. При этом если возникают достаточно большие истошающие изгибы зон в Ge, такая эдс генерируется в пленке даже при комнатной температуре, что и наблюдалось на эксперименте (рис. 2, а, кривые 3 и 4). Ясно, что эта эдс будет исчезать при наличии дополнительной подсветки, которая генерирует электронно-дырочные пары в области изгиба зон в GaAs и Ge, тем самым экранируя его.

Нужно отметить еще одну важную особенность, которая вытекает из сравнения амплитуд кривых 1 и 2 (рис. 1) и кривой 3 (рис. 2). Очевидно, что амплитуда этой последней кривой, соответствующая распределению фотоэдс в каждой точке образца, должна быть равна полусумме амплитуд кривых 1 и 2 (рис. 1), так как амплитуда эдс, связанной с долговременной релаксацией неравновесной проводимости, которая алгебраически складывается с объемно-градиентной эдс, не

меняется по величине при изменении направления движения зонда (при условии неизменности скорости его движения), а меняется только ее знак. Однако видно, что амплитуда кривой  $I$  (рис. 2), соответствующей распределению эдс при наличии дополнительной подсветки, меньше этой полусуммы.

Связано это с тем, что в образце возникает дополнительное напряжение на частоте модуляции, вызванное фотопроводимостью. Действительно, постоянная подсветка большой интенсивности приводит к возникновению постоянной во времени (не модулированной) объемно-градиентной эдс и, следовательно, дополнительного постоянного поля в образце. При освещении образца модулированным светом из области фундаментального поглощения Ge и GaAs в этом поле будет возникать напряжение [10]

$$E^- = V \cdot R \cdot \Delta\sigma, \quad (1)$$

где  $V$  — напряжение эдс от постоянной подсветки,  $R$  — сопротивление освещенной части образца,  $\Delta\sigma$  — фотопроводимость, возбуждаемая модулированным излучением.

Таким образом, измеряемая на опыте амплитуда эдс будет меньше и равна

$$E = E^{\sim} - V \cdot R \cdot \Delta\sigma, \quad (2)$$

где  $E^{\sim}$  — объемно-градиентная эдс, генерируемая в образце в отсутствие немодулированной подсветки.

7. Проведенные эксперименты и полученные результаты позволяют сделать ряд выводов.

В подложке и пленке градиенты темновых концентраций носителей заряда вдоль границы раздела направлены в противоположные стороны вдоль границы.

Наличие слоя оксидов между пленкой и подложкой приводит к возникновению изгибов зон в Ge и GaAs, пространственно разделенных между собой, что является причиной возникновения дополнительной эдс, медленно релаксирующей во времени и зависящей от скорости и направления движения светового зонда.

В начале указывалось на то, что в гетероструктурах, выращенных термическим испарением в вакууме, также наблюдалась долговременная релаксация фотоэдс. Но там она была связана с наличием рекомбинационно-дрейфовых барьеров, возникающих в приграничных слоях пленки вследствие их высокого легирования. Аналогичная по

своей природе эдс возникает и в образцах гетероструктур окисла, расположенного между пленкой и подложкой, но здесь барьеры локализованы на поверхностях пленки и подложки, примыкающих с двух сторон к окислу.

Ясна и причина малой амплитуды фотоэдс в таких гетероструктурах. Несмотря на то что пленки Ge являются более чистыми по сравнению с выращенными на подложках без слоя окисла, на поверхности, прилегающей к окислу, возрастает скорость рекомбинации, что значительно уменьшает амплитуду фотоэдс в тонких образцах даже при больших коэффициентах поглощения света в Ge.

Выполнение работы частично финансировалось Государственным фондом фундаментальных исследований Украины (проект 621/2-96).

## Список литературы

- [1] Шеховцов Л.В., Саченко А.В., Шварц Ю.М. // ФТП. 1995. Т. 29. В. 3. С. 566–574.
- [2] Семенова Г.Н., Крыштаб Т.Г., Шеховцов Л.В., Садофьев Ю.Г. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 5. С. 75–80.
- [3] Садофьев Ю.Г. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 10. С. 5–9.
- [4] Шейнкман М.К., Шик А.Я. // ФТП. 1976. Т. 10. С. 209–233.
- [5] Жадько Н.П., Кучерук А.Д., Романов В.А., Сердега Б.К., Шеховцов Л.В. // УФЖ. 1982. Т. 27. N 4. С. 622–624.
- [6] Sturge M.D. // Phys. Rev. 1962. V. 127. N 3. P. 768–773.
- [7] Dash W.C., Newman R. // Phys. Rev. 1955. V. 99. N 4. P. 1151–1155.
- [8] Aspnes D.E., Studna A.A. // Phys. Rev. B. 1983. V. 27. N 2. P. 985–1009.
- [9] Jain F.C. // J. Vac. Sci. Technol. 1983. B1. P. 661–667.
- [10] Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., Физматгиз, 1963. 496 с.