

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ИЗГИБА ЗОН ПО КИНЕТИКЕ БАРЬЕРНО-ЛОВУШЕЧНОЙ ФОТОЭДС

Бедный Б. И., Василевский М. И., Карпович И. А.

Одним из эффективных методов исследования энергетического спектра и зарядового состояния поверхности полупроводников является метод поверхностной фотоэДС (ПФЭ) [1-4]. В частности, этот метод используется для определения приповерхностного изгиба зон по фотоэДС насыщения на люксвольтовой характеристике. Однако в полупроводниках с малыми временами жизни носителей заряда необходимые для насыщения фотоэДС интенсивности освещения могут оказаться недопустимо высокими. Кроме того, в образцах с высокой плотностью поверхностных состояний на люксвольтовой характеристике ПФЭ возможно появление области перегиба, имитирующей насыщение, но не связанной со спрямлением зон. Эти обстоятельства существенно ограничивают применение методики фотоэДС насыщения.

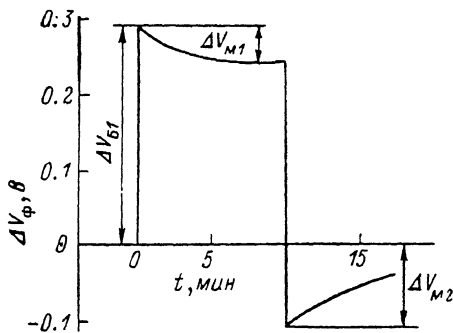


Рис. 1. Кинетика поверхностной фотоэДС в p -InP.

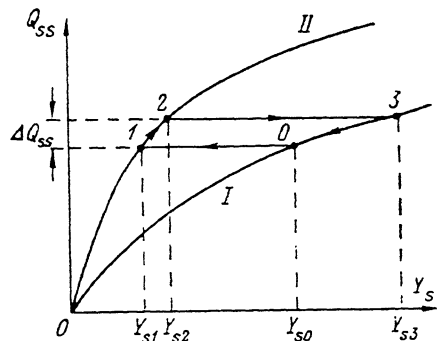


Рис. 2. Диаграмма изменения состояния поверхности полупроводника в процессе нарастания (0—1—2) и спада (2—3—0) фотоэДС.

I и II — зависимости поверхностного заряда от изгиба зон в темноте и при освещении соответственно.

В данном сообщении предлагается методика определения приповерхностного изгиба зон (φ_s) с помощью анализа параметров кинетики ПФЭ, измеренной в условиях относительно низкого уровня инжекции. Она применима к полупроводникам с барьерно-ловушечным механизмом ПФЭ, в которых скорость установления равновесия в квазинейтральном объеме и приповерхностной области пространственного заряда (ОПЗ) значительно превышает скорость установления равновесия между поверхностными ловушками и объемом.

Исследования кинетики нарастания и спада поверхностной фотоэДС в ряде полупроводников [5-9] показывают, что зависимость $\Delta V_\phi(t)$ часто состоит из двух компонент — быстрой и медленной, с постоянными времени, различающимися на 2—3 порядка. Подобная кинетика ПФЭ обнаружена нами при исследовании монокристаллов фосфида индия (рис. 1). Медленная компонента фотоэДС обусловлена фотостимулированным накоплением носителей заряда на поверхностных состояниях, а также, возможно, на ловушках оксида, т. е. связана с изменением поверхностного заряда. Быстрая компонента обычно обусловлена перераспределением носителей в ОПЗ (чисто барьерная фотоэДС), но может включать и процессы захвата носителей на быстрые поверхностные состояния. Предлагаемая методика применима в том случае, когда изменением поверхностного заряда за время установления быстрой компоненты можно пренебречь. С учетом такого допущения начальный приповерхностный изгиб зон можно рассчитать по экспериментально определяемым параметрам кинетики ΔV_{B1} , ΔV_{M1} и ΔV_{M2} (рис. 1). Методика расчета поясняется диаграммой на рис. 2.

Исходному состоянию поверхности соответствует точка 0 на темновой зарядовой кривой I . При освещении в процессе формирования барьерной (быстрой) компоненты фотоэдс устанавливается изгиб зон

$$Y_{s1} = Y_{s0} - \frac{q\Delta V_{B1}}{kT} \quad (1)$$

и система переходит в состояние I (горизонтальный переход $0-I$). Для такого перехода из условия сохранения поверхностного заряда получаем

$$F(Y_{s0}, \lambda) = F(Y_{s1}, \lambda, \delta), \quad (2)$$

где $F(Y_s, \lambda)$ и $F(Y_s, \lambda, \delta)$ — известные из теории для стандартной модели ОПЗ функции [1], $\lambda = (p_0/n_i)$ — безразмерная концентрация дырок, $\delta = (\Delta n/n_i) = (\Delta p/n_i)$ — безразмерный уровень инжекции.

Захват носителей заряда на поверхностные ловушки (медленная компонента ПФЭ) сопровождается изменением поверхностного заряда на величину ΔQ_{ss} и переходом системы в стационарное квазиравновесное состояние 2 , которому соответствует изгиб зон

$$Y_{s2} = Y_{s0} - \frac{q}{kT} (\Delta V_{B1} - \Delta V_{M1}). \quad (3)$$

Быстрая компонента кинетики спада ПФЭ (рис. 1) обусловлена релаксацией барьерной фотоэдс, протекающей при фиксированном значении Q_{ss} . Этому процессу на диаграмме соответствует горизонтальный переход в неравновесное состояние 3 , характеризующееся изгибом зон

$$Y_{s3} = Y_{s0} + \frac{q\Delta V_{M2}}{kT}. \quad (4)$$

Заключительная стадия релаксационного процесса (переход $3-0$) обусловлена восстановлением термодинамического равновесия между поверхностными ловушками и квазинейтральным объемом полупроводника. Приравнявая изменения заряда поверхности при переходах $1-2$ и $3-0$, получаем

$$F(Y_{s2}, \lambda, \delta) - F(Y_{s1}, \lambda, \delta) = F(Y_{s3}, \lambda) - F(Y_{s0}, \lambda). \quad (5)$$

Уравнения (2) и (5) с учетом соотношений (1), (3), (4), в которые входят величины, найденные экспериментально, содержат только два неизвестных параметра — Y_{s0} и δ . Эти параметры могут быть определены численно. Отметим, что для определения уровня инжекции в данном случае не требуется предварительного измерения мощности падающего на поверхность потока излучения и знания оптических констант материала. Если последние известны, то по значению δ может быть найдено время жизни носителей.

Очевидно, методика применима (при сделанных допущениях) и к длинновременной релаксации возрастающего типа. В этом случае состояния 2 , 3 (рис. 2) располагаются ниже состояний 1 , 0 .

Описанная методика была применена при анализе кинетики поверхностной фотоэдс в фосфиде индия. Зависимость $\Delta V_{\phi}(t)$ (рис. 1) получена методом динамического конденсатора на монокристаллах p -типа проводимости [$p_0 \approx 2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\lambda \approx 1.5 \cdot 10^9$, ориентация поверхности (100)]. Поверхность подвергалась химико-механической обработке с последующим удалением нарушенного слоя в полирующем травителе [10]. При измерении фотоэдс поверхность полупроводника освещали сфокусированным неразложенным светом от галогеновой лампы типа КГМ. Интенсивность потока излучения на поверхности составляла $\sim 0.2 \text{ Вт/см}^2$.

Знак быстрой компоненты фотоэдс (рис. 1) соответствует увеличению работы выхода полупроводника при освещении и свидетельствует о наличии приповерхностного слоя истощения или инверсии ($Y_{s0} > 0$). Медленная компонента фотоэдс имеет противоположный знак, соответствующий накоплению на поверхности при освещении положительного заряда (фотодырок).

Результаты численного решения уравнений (2) и (5) с использованием типичных для исследованных нами образцов параметров кинетики (рис. 1) пока-

зывают, что начальный приповерхностный изгиб зон Y_{s0} в зависимости от предыстории образцов и толщины стравленного слоя составляет $\sim 15 \div 20$. Значения δ на разных образцах $\sim (3 \div 15) \cdot 10^5$.

Полученные значения высоты поверхностного барьера $\sim 0.4 \div 0.5$ В на $0.1 \div 0.15$ В превышали значения фотоэдс, измеренные при максимальной в условиях эксперимента интенсивности освещения. Исследование люксвольтовых характеристик ПФЭ показало, что зависимость $\Delta V_{\phi}(L)$ логарифмическая, причем величина ΔV_{ϕ} изменяется на ~ 0.05 В на декаду изменения интенсивности освещения. Таким образом, для достижения насыщения фотоэдс потребовалось бы увеличить интенсивность освещения еще по крайней мере на 2—3 порядка величины.

Л и т е р а т у р а

- [1] Ржанов А. В. Электронные процессы на поверхности полупроводников. М., 1971. 480 с.
- [2] Царенков Б. В., Гольдберг Ю. А., Львова Т. В. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 6. С. 1230—1232.
- [3] Саченко А. В., Снитко О. В. Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников. Киев, 1984. 231 с.
- [4] Balestra C. L., Lagowski J., Gatos H. C. // Surf. Sci. 1977. V. 64. N 2. P. 457—464.
- [5] Gatos H. C., Lagowski J. // J. Vac. Sci. Techn. 1973. V. 10. N 1. P. 130—134.
- [6] Карпович И. А., Калинин А. Н., Бедный Б. И., Бенедиктов Ю. А. // Изв. вузов СССР. Физика. 1976. № 3. С. 51—54.
- [7] Дмитрук Н. Л., Лященко В. И., Терещенко А. К. // УФЖ. 1972. Т. 17. В. 8. С. 1356—1358.
- [8] Бедный Б. И., Калинин А. Н., Карпович И. А. // Микроэлектрон. 1980. Т. 9. В. 6. С. 564—568.
- [9] Давыдов И. А., Катунин Б. Д., Страхов Л. П. // Вестн. ЛГУ. 1985. № 18. С. 85—87.
- [10] Бедный Б. И., Карпович И. А., Савинов А. Н. // Поверхность. 1988. № 6. С. 64—67.

Горьковский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского

Получено 5.07.1988
Принято к печати 6.09.1988

ФТП, том 23, вым. 2, 1989

АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЗАТУХАНИЯ АКУСТОЭДС В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЯХ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

Лубяная М. Д., Марончук И. Е., Юцис А. И.

Электронная спектроскопия с помощью акустических поверхностных волн (ПАВ) в структуре пьезоэлектрик—полупроводник находит все более широкое применение при исследовании свойств поверхности тонких слоев и полупроводниковых материалов. Метод основан на использовании взаимодействия этих волн (ПАВ) со свободными носителями заряда в исследуемом слое [1].

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты исследования поведения акустоэдс в эпитаксиальных слоях арсенида галлия, полученных жидкофазной эпитаксией из растворов арсенида галлия в различных растворителях.

Эпитаксиальные слои получены в процессе принудительного охлаждения из ограниченного объема насыщенного раствора арсенида галлия в расплавах галлия, свинца и висмута, а также из смеси свинца и висмута с избытком галлия или мышьяка на подложках монокристаллического арсенида галлия с ориентациями $\langle 100 \rangle$, $\langle 111A \rangle$, $\langle 111B \rangle$. Выращивание осуществлялось из нелегированных растворов, а также легированных хромом или германием.

Исследования проводили в слоистой структуре, состоящей из звукопровода ниобата лития и полупроводника, на частотах 20 МГц. Длительность акустических импульсов $1.5 \cdot 10^{-6}$ с в темноте и при освещении. Расстояние между ис-