

Фоточувствительность структур с квантовыми ямами, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, при нормальном падении излучения

© В.Б. Куликов[¶], Г.Х. Аветисян, Л.М. Василевская, И.Д. Залевский*, И.В. Будкин*, А.А. Падалица*

ГУП НПП „Пулсар“,
105187 Москва, Россия

* ООО „Сигм Плюс“,
109377 Москва, Россия

(Получена 15 апреля 2003 г. Принята к печати 22 мая 2003 г.)

В последнее время для выращивания приборных структур с квантовыми ямами наряду с молекулярно-лучевой эпитаксией все больше используют газофазную эпитаксию из металлоорганических соединений (МОС-гидридную эпитаксию). Наш опыт работы с фотоприемниками на основе структур с квантовыми ямами, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, показывает, что они обладают рядом отличий от аналогов, полученных с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии. К таким отличиям следует отнести более существенную асимметрию вольт-амперной характеристики, наличие значительной фоточувствительности при нормальном падении излучения без специальных устройств ввода. Указанные отличия связаны, на наш взгляд, с особенностями процесса эпитаксии. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования таких фотоприемников на основе структур с квантовыми ямами, обсуждается их связь со структурными особенностями, обусловленными процессом МОС-гидридной эпитаксии.

1. Введение

До недавнего времени в публикуемых экспериментальных работах по фотопроводимости (ФП) структур с квантовыми ямами (СКЯ) последние выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Наш опыт исследования СКЯ, выращенных методом МОСГЭ (газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений, МОС-гидридная эпитаксия), показывает, что ФП таких структур обладает рядом особенностей по сравнению с тем, что наблюдается для СКЯ, выращенных МЛЭ. К таким особенностям следует отнести более существенную асимметрию вольт-амперных характеристик (ВАХ), наличие значительной фоточувствительности при нормальном падении излучения без специальных устройств ввода. Указанные особенности связаны, на наш взгляд, с различиями в технологии выращивания СКЯ.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования ФП СКЯ, полученных методом МОС-гидридной эпитаксии, обсуждается их связь с особенностями СКЯ, обусловленными процессом эпитаксии.

2. Экспериментальные образцы

Исследованные структуры выращивались методом МОСГЭ при давлении 65 мм рт.ст. и при температуре $\sim 700^\circ\text{C}$ на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией $\langle 100 \rangle$. Структуры с квантовыми ямами содержали 50 периодов гетероструктур, в которых яма из GaAs

имела ширину 50 \AA , а барьер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.24$) — 450 \AA . Ямы легировались кремнием до концентрации 10^{18} см^{-3} . Верхний и нижний контактные слои имели толщину 0.5 и 1 мкм соответственно и легировались до концентрации выше 10^{18} см^{-3} .

Из выращенных структур с использованием химического травления изготавливались экспериментальные образцы фотосопровителений (ФС) в виде меза-структур размером $400 \times 400 \text{ мкм}^2$. Специальные устройства ввода излучения в ФС типа дифракционной решетки отсутствовали. Омические контакты формировались посредством напыления через маску из фоторезиста сплава Au:Ge, взрыва напыленного слоя и последующего его вжигания. Полученные таким образом контакты покрывались слоями Ti и Al.

3. Экспериментальные результаты

При исследованиях экспериментальных образцов ФС измерялись ВАХ при различных температурах, спектры фоточувствительности и определялись зависимости абсолютной чувствительности в максимуме спектра от напряжения, а также зависимости шумового тока от напряжения. На основе полученных результатов рассчитывались зависимости коэффициента фотоэлектрического усиления и обнаружительной способности ФС от напряжения и температуры. Спектры фоточувствительности измерялись на специализированном стенде на основе монохроматора МДР-41. Измерения абсолютной фоточувствительности производились с помощью источника модулированного излучения, в котором излучателем являлся макет абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой 573 К. Излучение модулировалось с частотой 1200 Гц. Измерение сигналов и шумов ФС

[¶] E-mail: vladimir_kulikov@mtu-net.ru
Fax: (095) 3690886

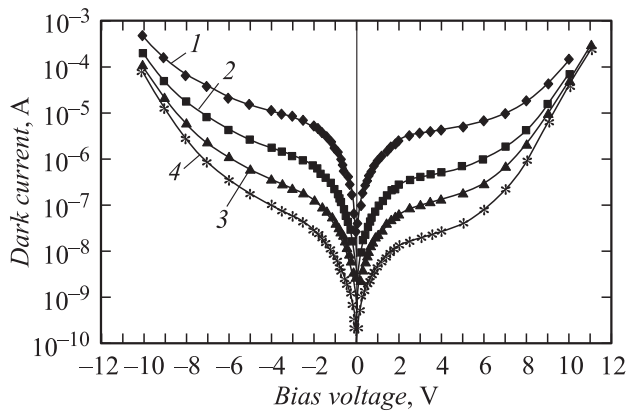


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики ФС на основе СКЯ при температурах, К: 1 — 78, 2 — 70, 3 — 65, 4 — 60.

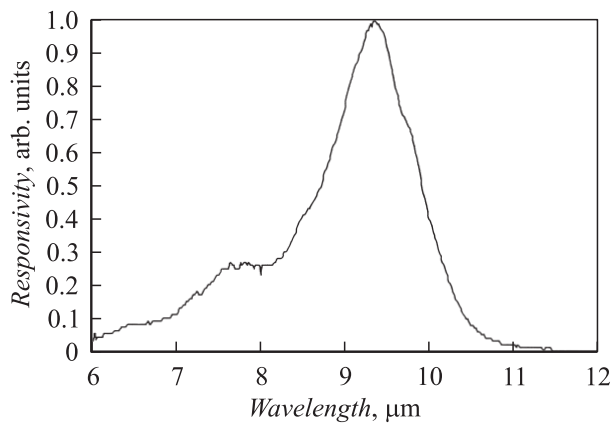


Рис. 2. Спектр фоточувствительности ФС на основе СКЯ.

осуществлялось с помощью узкополосного усилителя с резонансной частотой 1200 Гц и шириной полосы пропускания 200 Гц. При измерениях образцы размещались в заливном криостате с возможностью откачки паров жидкого азота, обеспечивающем охлаждение образцов до 60 К. Перед образцами размещалась охлаждаемая диафрагма, обеспечивавшая поле зрения в угле $\sim 25^\circ$.

На рис. 1 представлены ВАХ одного из образцов ФС, защищенных от фоновой засветки холодным экраном. Правые ветви ВАХ (положительные смещения) соответствуют знаку „–“ напряжения питания на верхнем контакте ФС, т.е. направление поля совпадает с направлением роста СКЯ. ВАХ исследованных образцов были отчетливо асимметричными. Отметим, что для полярности напряжения питания, соответствующей знаку „+“ на верхнем контакте, характерна более высокая фоточувствительность при одном и том же значении напряжения.

На рис. 2 представлен спектр фоточувствительности, полученный при одной полярности напряжения („+“ на верхнем контакте ФС). Форма спектра и положение его максимума не испытывают существенных изменений с изменением температуры в интервале 60–77 К или напряжения на образце в интервале 1–4 В.

На рис. 3 представлены зависимости абсолютной чувствительности одного из образцов ФС в максимуме спектра от напряжения питания при обоих его полярностях и различных температурах. Зависимости получены с учетом коэффициента использования излучения от АЧТ, который рассчитывался посредством численного интегрирования спектра фоточувствительности (см. рис. 2). Помимо асимметрии этих зависимостей обращает на себя внимание величина чувствительности, достигающая десятых долей А/Вт. Столь значительная величина чувствительности получена на образцах ФС без специальных устройств ввода излучения при нормальном его падении по отношению к фронтальной поверхности ФС. На рис. 4 приведены зависимости шумового тока I_n ФС от напряжения при двух его полярностях и различных температурах. На основе этих кривых по известной формуле $I_n = (4eI_d g \Delta f)^{1/2}$ (e — заряд электрона, I_d — темновой ток, g — коэффициент фотоэлектрического усиления, Δf — полоса частот, в которой регистрируется шум) определялись зависимости коэффициента фотоэлектрического усиления ФС от напряжения, представленные на рис. 5. Значение g находится в пределах 0.5–0.6, что является типичным

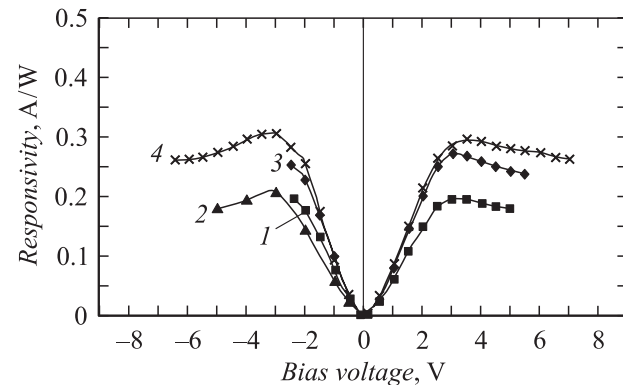


Рис. 3. Зависимости абсолютной чувствительности ФС на основе СКЯ в максимуме спектра от напряжения при температурах, К: 1 — 78, 2 — 70, 3 — 65, 4 — 60.

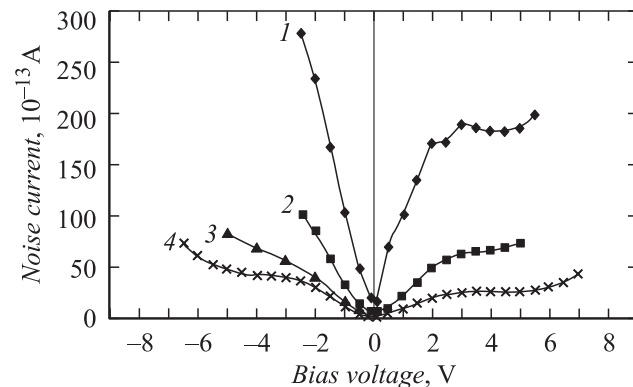


Рис. 4. Зависимости шумового тока ФС на основе СКЯ от напряжения при температурах, К: 1 — 78, 2 — 70, 3 — 65, 4 — 60.

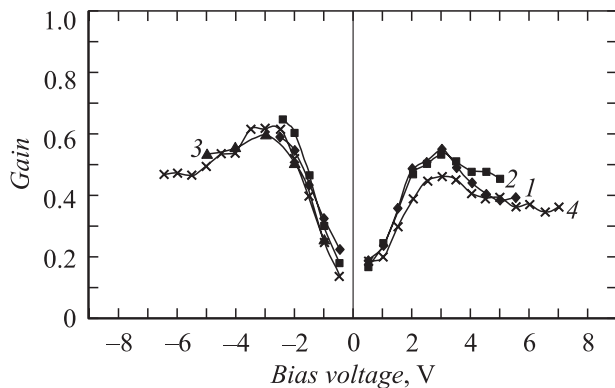


Рис. 5. Зависимость коэффициента фотоэлектрического усиления ФС на основе СКЯ от напряжения при температурах, К: 1 — 78, 2 — 70, 3 — 65, 4 — 60.

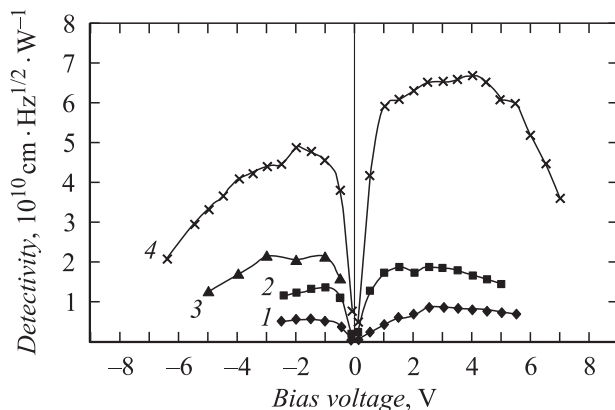


Рис. 6. Зависимость обнаружительной способности ФС на основе СКЯ от напряжения при температурах, К: 1 — 78, 2 — 70, 3 — 65, 4 — 60.

для ФС из структур, выращенных МЛЭ, и говорит о неплохом качестве барьеров в исследуемых образцах.

На рис. 6 приведены зависимости обнаружительной способности ФС $D_{\lambda \max}^*$ от напряжения при различных температурах. Величина $D_{\lambda \max}^*$ рассчитывалась на основе результатов измерения абсолютной чувствительности и шумового тока (рис. 3, 4).

4. Обсуждение результатов

На основании полученных результатов можно заключить, что исследованные образцы структур включают квантовые ямы, которые не являются симметричными. Последнее утверждение может быть сделано хотя бы на основании того, что ВАХ и зависимости чувствительности от напряжения являются асимметричными. Аналогичные результаты были получены на СКЯ, выращенных методом МЛЭ, с ямами, изготовленными асимметричными специально [1]. В работе [1] было также показано, что при направлении внешнего поля в сторону более резкой границы асимметричной ямы наблюдаются бóльшая чувствительность и бóльшие токи,

чем в противоположной полярности, при одном и том же напряжении. Асимметрия границ ямы может приводить к различию в коэффициентах надбарьерного отражения носителей и, как следствие, к различию коэффициентов фотоэлектрического усиления при разных полярностях внешнего напряжения. Учет этих результатов при анализе зависимостей на рис. 1 и 3 позволяет сделать предположение, что начальные границы барьеров (т.е. границы яма-барьер в начале его роста) являются более пологими, чем конечные.

Остановимся теперь на эффекте anomalно большой чувствительности ФС при нормальном падении излучения в отсутствие специальных устройств ввода. Ее величина, как известно, зависит от двух факторов: коэффициента фотоэлектрического усиления g и квантовой эффективности η . Значения g , как отмечалось выше, не являются anomalно большими. Оценка η из формулы для чувствительности ФС $R_{\lambda \max} = (e/h\nu)\eta g$, где $h\nu$ — энергия фотона, дает величину η выше 8%. В обычных ФС на основе СКЯ, выращенных МЛЭ, при нормальном падении излучения величина η существенно меньше. Наличие значительной квантовой эффективности отражается и на значениях обнаружительной способности, которые также оказались неожиданно большими по сравнению с типичными значениями для СКЯ без устройств ввода излучения (рис. 6). Заметное повышение квантовой эффективности ФС на основе СКЯ, полученных МЛЭ, при нормальном падении излучения достигалось в случаях выращивания структур на подложках с ориентацией, при которой тензор эффективной массы имеет недиагональные члены, т.е. когда импульс электрона, взаимодействующего с электрическим полем электромагнитной волны, направленным вдоль плоскости ямы, имеет составляющую, перпендикулярную слоям СКЯ [2]. В нашем случае все подложки, на которых выращивались СКЯ, имели ориентацию $\langle 100 \rangle$, что не должно приводить к появлению указанных эффектов. Наличие заметной фоточувствительности в наших СКЯ при нормальном падении излучения можно было бы объяснить действием боковой поверхности мезы ФС как своеобразной призмы, выполняющей функцию устройства ввода. Однако оценки, сделанные на основе сопоставления площадей боковой и фронтальной поверхностей мезы, показывают, что для реализации полученной чувствительности в несколько десятых долей А/Вт либо время жизни неравновесных носителей в СКЯ должно быть выше 10^{-8} с, либо квантовая эффективность должна превышать 100%. Измерения шумов не подтвердили ни одно из указанных предположений. Добавим также, что обратная сторона подложек ФС, которая при плохой обработке могла бы рассеивать сигнальное излучение и служить устройством ввода, в нашем случае была полированной.

Для объяснения полученного результата обратим внимание на следующее обстоятельство. Слабое поглощение излучения при его нормальном падении наблюдается, как правило, в СКЯ, выращенных методом МЛЭ.

Такие СКЯ в наибольшей степени соответствуют модели прямоугольных и симметричных ям, положенной в основу теории, объясняющей это явление. Однако для прямоугольных асимметричных ям такая теория не разработана. Между тем, как показано в работе [3], отклонения формы ям от симметричной могут существенно влиять на поляризационную зависимость поглощения излучения в СКЯ. В случае СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, возможно существенное отклонение формы реальных ям от классической модели. Возникновение асимметрии в резкости границ яма-барьер может быть связано с особенностями процесса МОСГЭ. В МОСГЭ газовые реагенты имеют более высокое давление. Они имеют более высокую вязкость, что может приводить к продолжительным переходным процессам при переключении газовых потоков и, как следствие, к более существенным, чем в случае МЛЭ, отклонениям формы ямы от прямоугольной и симметричной. Кроме того, как отмечалось выше, процессы МОСГЭ проходят при температурах выше 700°C . При этих температурах диффузия кремния, которым обычно легируют ямы, становится весьма существенной [4], т. е., независимо от начального положения области легирования, по окончании процесса роста профиль распределения примеси не будет локализован в пределах ямы. Иначе говоря, во всех исследованных структурах, независимо от места введения примеси, она будет присутствовать и в ямах, и в барьерах. Это приведет к тому, что при охлаждении до криогенных температур примесь в барьерах будет ионизована, поскольку электроны перейдут на уровни в ямах, и на границе ям и барьеров возникнет встроенное поле. Приближенные оценки показывают, что величина поля может достигать 10^5 В/см. Такое поле могло бы вызывать деформацию изначально прямоугольной и симметричной ямы и, как следствие, приводить к появлению заметного поглощения излучения при нормальном падении. О возможности такого влияния электрического поля на механизмы поглощения излучения в СКЯ указывалось в цитированной работе [4], а также в работе [5]. Обсуждаемый эффект будет существенно слабее выражен в СКЯ, полученных МЛЭ, поскольку практически всегда в них легируют середину ямы, и при температурах роста $\sim 500^{\circ}\text{C}$ примесь не успевает продиффундировать в барьеры.

Заключения, сделанные на основе проведенного выше анализа причин появления аномально высокой чувствительности, а также других особенностей ФС на основе СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, имеют в основном характер предположений. Поэтому для установления истинных причин описанных явлений требуются дальнейшие исследования.

5. Заключение

Проведено исследование характеристик фотоприемников на основе СКЯ, выращенных методом МОСГЭ. Анализ экспериментальных ВАХ, зависимостей абсолютной

чувствительности от напряжения, спектров фоточувствительности дает основания полагать, что ямы в СКЯ являются несимметричными. Неожиданным результатом явилось наличие весьма значительной фоточувствительности в ФС на основе СКЯ при нормальном падении излучения, хотя никаких специальных устройств ввода излучения ФС не имели. Проведен анализ возможных причин наблюдаемых явлений. Установление их физической природы, а также получение более детальной информации о структурных особенностях СКЯ, полученных методом МОСГЭ, требуют дальнейших исследований.

Список литературы

- [1] A. Brandel, A. Fraenkel, E. Finkman, G. Bahir, G. Livescu. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, S412 (1993).
- [2] Y. Zhang, N. Baruh, W.I. Wang. *Electron. Lett.*, **29** (2), 213 (1993).
- [3] W.E. Hagston, T. Stirner, F. Rasul. *J. Appl. Phys.*, **89** (2), 1087 (2001).
- [4] D.G. Deppe, N. Holonyak. *J. Appl. Phys.*, **64** (12), R93 (1988).
- [5] А.Я. Шик. *ФТП*, **20** (9), 1598 (1986).

Редактор Л.В. Шаронова

Responsivity of multiple quantum well structures, grown by MOCVD at normal incidence

V.B. Kulikov, G.H. Avetisyan, L.M. Vasilevskaya, I.D. Zalevsky, I.V. Budkin*, A.A. Padalitsa**

SPE „Pulsar“,
105187 Moscow, Russia
* „Sigm Plus“Co.,
109377 Moscow, Russia

Abstract The success in the area of multiple quantum well (MQW) devices development have been achieved mainly due to employment of molecular beam epitaxy (MBE). However at the same time for MQW growing metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) is used, because of its more high productivity. Our experience in MOCVD grown MQW and photodetectors based on them shows, that they have some differences from MBE grown analogs. These differences are: more high asymmetry of current-voltage characteristics, considerable responsivity at normal incidence. We believe, that differences mentioned above are related with features of MOCVD. In this report we present experimental results of reponsivity investigation of MOCVD grown MQW, relation between experimental results and MOCVD grown MQW features is discussed.