

Фоточувствительность структур с квантовыми ямами при нормальном падении излучения

© В.Б. Куликов[¶], В.П. Чалый*

Открытое акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт „Циклон“»,
107497 Москва, Россия

* Закрытое акционерное общество „Светлана–Рост“,
194156 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 апреля 2013 г. Принята к печати 22 мая 2013 г.)

Представлены результаты исследований фоточувствительности при нормальном падении излучения структур с квантовыми ямами, выращенных методами молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии, но имеющих номинально одинаковую конструкцию. Установлено, что образцы, выращенные газофазным методом, имеют в этом случае более высокую чувствительность. Образцы же, выращенные методом молекулярной эпитаксии, более чувствительны к излучению, имеющему составляющую вектора электрического поля, перпендикулярную слоям структур с квантовыми ямами. На основе полученных результатов сделано предположение, что селективность фоточувствительности по отношению к поляризации излучения в образцах, выращенных газофазным методом, заметно подавляется. Среди наиболее вероятных причин указанного эффекта рассматривается возникновение на границах барьер-яма встроенного электрического поля, связанного с проникновением в барьеры примеси в процессе выращивания структур с квантовыми ямами.

1. Введение

С момента появления первых значимых работ по фоточувствительности структур с квантовыми ямами (СКЯ) и по настоящее время принято считать, что селективность чувствительности СКЯ по отношению к поляризации излучения является неотъемлемым фундаментальным свойством, осложняющим применение фотоприемников на их основе [1]. Указанная особенность СКЯ предсказывалась теоретически на основе модели прямоугольной симметричной квантовой ямы. Первые же эксперименты, выполненные на СКЯ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), подтвердили весьма заметную селективность их фоточувствительности по отношению к поляризации излучения. Предпринятые попытки преодолеть селективность чувствительности, особенно в многоэлементных фотоприемниках, сводились к созданию на поверхности чувствительных элементов устройств, изменяющих направление распространения входного излучения по отношению к плоскости слоев СКЯ. Как правило, такие устройства выполняются в виде различного рода дифракционных решеток. Между тем по мере расширения фронта исследований СКЯ стали появляться экспериментальные работы, в которых сообщалось о наблюдении заметной фоточувствительности СКЯ при нормальном падении излучения. Для объяснения причин обнаруженного эффекта использовались разнообразные модели процессов поглощения излучения в СКЯ, в основе которых лежали предположения, опирающиеся, например, на анизотропию эффективной массы электронов в СКЯ, выращенных на подложках со сложной ориентацией [2], на влияние эффектов спин-орбитального взаимодействия [3] и др. [4]. Однако оценки, сделанные на основе предло-

женных моделей, не дали результатов, количественно близких к экспериментальным. Следует отметить, что подавляющее большинство экспериментальных работ по исследованию СКЯ вообще и их фоточувствительности в частности было выполнено при использовании СКЯ, выращенных методом МЛЭ. Среди немногочисленных публикаций по исследованию СКЯ, выращенных иным, чем МЛЭ, методом, отметим работу [5], где было экспериментально показано, что СКЯ, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ), могут иметь весьма значительную фоточувствительность без специальных устройств ввода излучения. На основании полученных результатов было сделано предположение, что неожиданно высокая чувствительность может быть связана с возникновением встроенного электрического поля на границах яма-барьер из-за проникновения примеси (кремния), которой легируют ямы, в барьеры в процессе роста СКЯ. Оценки показывают, что такое проникновение возможно благодаря относительно высокой — свыше 700°C — температуре роста при МОСГЭ. Возможность подавления селективности поглощения в СКЯ по отношению к поляризации при наличии встроенного электрического поля предсказывалась в работе [6].

В настоящей работе представлены результаты исследований, направленных на установление причин возникновения anomalно высокой фоточувствительности СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, в том числе результаты сравнительных измерений фоточувствительности СКЯ, полученных методами МЛЭ и МОСГЭ. Анализ результатов дает основания в пользу предположения, что причиной повышенной чувствительности СКЯ, полученных методом МОСГЭ, является проникновение кремния в барьеры, приводящее при охлаждении к возникновению встроенного электрического поля на границах яма-барьер.

[¶] E-mail: vokul@inbox.ru

2. Экспериментальные образцы и особенности измерений

Для проведения исследований были использованы образцы СКЯ, выращенные методом МОСГЭ и МЛЭ, имевшие номинально очень сходные конструкции. На подложке из полупроводящего GaAs с ориентацией (100) последовательно выращивались: нижний контактный слой n^+ -GaAs ($n \approx 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 1.5 мкм; 50 периодов барьер-яма состава: барьер — $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $x = 0.27$, нелегированный толщиной 450 Å; яма — GaAs, $n = 9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщиной 50 Å; верхний контактный слой n^+ -GaAs ($n \approx 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 0.8 мкм. Выращивание СКЯ методом МОСГЭ проводилось при температуре свыше 700°C , а при выращивании методом МЛЭ не выше 600°C . Из выращенных СКЯ изготавливались тестовые фотоприемники в виде мезоструктур размером $400 \times 400 \text{ мкм}$. Металлические контакты из Au:Ge/Au на поверхности мезы имели размер $100 \times 100 \text{ мкм}$. Часть тестовых фотоприемников имела со стороны верхнего контакта устройство ввода излучения в виде двумерной фазовой дифракционной решетки (ДР) с периодом 4 мкм и глубиной травленных отверстий около 0.7 мкм. Глубина отверстий выбиралась так, чтобы подавить нулевой порядок дифракции на длинах волн вблизи максимума спектра фоточувствительности. В образцах с ДР верхний контакт полностью покрывался металлом. Тестовые фотоприемники наклеивались на диэлектрические платы со стороны верхнего контакта, т.е. так, чтобы излучение поступало в СКЯ со стороны подложки. Подготовленные таким образом тестовые образцы размещались в вакуумируемом криостате, охлаждаемом жидким азотом и имевшем германиевое окно для доступа сигнального излучения.

Измерения спектров фоточувствительности проводились с помощью монохроматора МДР-41. Для измерений абсолютной фоточувствительности использовался макет абсолютно черного тела (АЧТ) при температуре 300°C с модулятором. При измерении шумов, которое проводилось для определения коэффициента фотоэлектрического усиления, использовался малошумящий усилитель SR570. При проведении всех измерений образцы тестовых фотоприемников находились при температуре около 80 К.

3. Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 1 представлены спектры фоточувствительности образцов ФП (без ДР), изготовленных из МОСГЭ и МЛЭ СКЯ. Сходство номинальных конструктивных параметров (толщин и состава слоев) СКЯ обеспечило и сходство спектральных характеристик чувствительности. Отметим также, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов (не показаны) имели удовлетворительное совпадение как по количественным показателям, так и по характеру асимметрии — при отрицательной

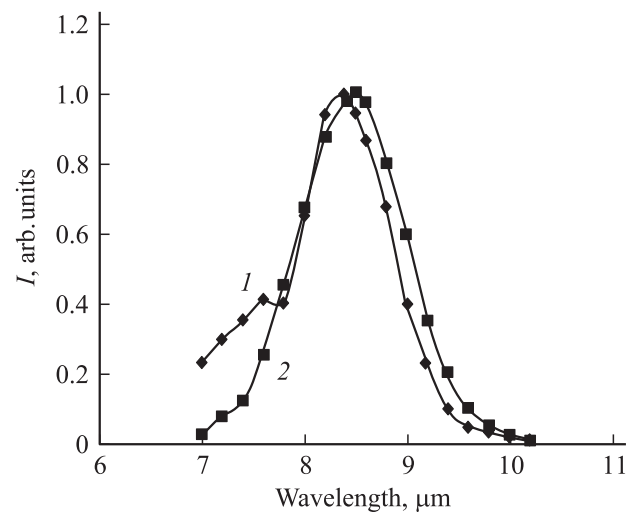


Рис. 1. Спектры фоточувствительности тестовых образцов ФП на основе СКЯ, выращенных методом: 1 — МЛЭ, 2 — МОСГЭ.

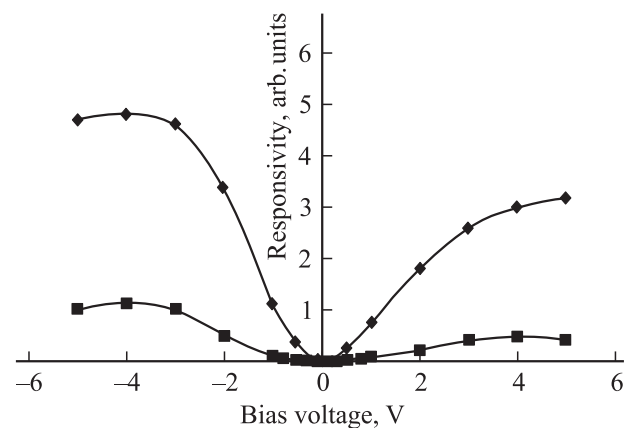


Рис. 2. Зависимости фоточувствительности от напряжения смещения образцов МЛЭ и МОСГЭ СКЯ.

полярности напряжения смещения на нижнем контактном слое токи существенно выше, чем при обратной полярности. Сходство указанных характеристик позволяет сделать предположение о реальном конструктивном сходстве исследуемых СКЯ и использовать при дальнейшем анализе наблюдаемых эффектов ограниченное количество конструктивных параметров.

На рис. 2 представлены зависимости абсолютной чувствительности тестовых образцов фотоприемников (ФП) на основе СКЯ, выращенных методами МОСГЭ и МЛЭ. Чувствительность измерялась при нормальном падении излучения, а ФП не имели ДР. При обеих полярностях напряжения смещения на ФП чувствительность МОСГЭ ФП примерно в 5 раз выше, чем ФП, изготовленного из МЛЭ СКЯ. Поскольку конструктивно тестовые ФП были идентичны, т.е. имели форму мезы одинакового размера, а боковая поверхность имела одинаковый наклон, то едва ли есть основания объяснять различие значений чувстви-

тельности геометрическими особенностями образцов, например разным вкладом боковой поверхности в эффективность ввода излучения. Из известного определения чувствительности фотопроводника: $R = (e\lambda/hc)\eta g$, где η — квантовая эффективность, g — коэффициент фотоэлектрического усиления, h — постоянная Планка, λ — длина волны излучения, c — скорость света в вакууме, e — заряд электрона; следует, что при прочих равных условиях на ее значение оказывают решающее влияние лишь два фактора: η и g . Измерения шумов обоих образцов ФП и расчет на их основе коэффициентов фотоэлектрического усиления показал, что значения g в обоих случаях имеют довольно близкие значения, лежащие в интервале 0.15–0.25 при напряжениях смещения 2–4 В. Таким образом, единственным фактором, определяющим столь значительное различие в чувствительности, остается квантовая эффективность. Рассчитанные с использованием формулы для R , приведенной к максимуму спектра фоточувствительности, значения квантовой эффективности составили 1.5 и 8% для МЛЭ СКЯ и МОСГЭ СК соответственно.

Для определения зависимости фоточувствительности СКЯ, выращенных разными методами, от поляризации сигнального излучения проводились ее исследования в образцах ФП СКЯ с ДР. На рис. 3 и 4 представлены зависимости абсолютной чувствительности от напряжения смещения МЛЭ СКЯ и МОСГЭ СКЯ с ДР в качестве устройств ввода излучения. Для сравнения представлены также аналогичные зависимости для образцов без ДР.

Как видно из рис. 3, образец МЛЭ СКЯ с ДР ожидаемо обладает значительно более высокой чувствительностью — почти в 3 раза, чем такой же образец без ДР. Чувствительность же образца МОСГЭ СКЯ с ДР (рис. 4) возросла лишь примерно на 30% по сравнению с таким же образцом без ДР. Можно предположить, что столь различное поведение образцов СКЯ, выращенных с использованием различных методов, связано с различной степенью влияния в них селективности чувствительности по отношению к поляризации излучения. Как уже отмечалось выше, различие исследуемых образцов по чувствительности обусловлено главным образом их различием по квантовой эффективности. Согласно известной формуле [7], учитывающей многократные отражения от фронтальной и тыловой поверхностей, квантовая эффективность η фотоприемника в виде плоскопараллельного образца может быть представлена как

$$\eta = (1 - R_1)[1 - \exp(-\alpha l)][1 + R_2 \exp(-\alpha l)] \times [1 - R_1 R_2 \exp(-2\alpha l)]^{-1}, \quad (1)$$

где R_1 и R_2 — коэффициенты отражения излучения от фронтальной и тыловой поверхностей фотоприемника соответственно, α — коэффициент поглощения излучения в активной области фотоприемника, l — толщина поглощающей области. В случае без ДР формула (1) при $R_1 = R_2 \approx 0.5$ для образцов обоих типов может

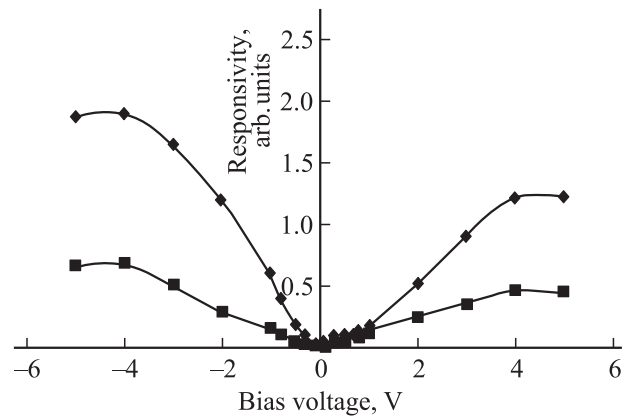


Рис. 3. Зависимости фоточувствительности от напряжения смещения образцов МЛЭ СКЯ с ДР и без нее.

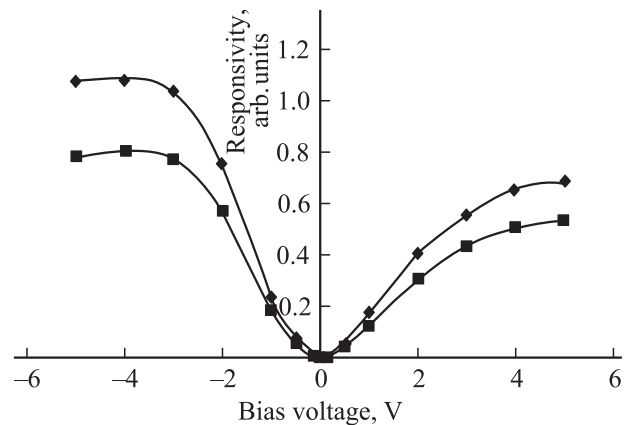


Рис. 4. Зависимости фоточувствительности от напряжения смещения образцов МОСГЭ СКЯ с ДР и без нее.

быть представлена в виде: $\eta \approx \alpha l$ (при условии, что $\alpha l \ll 1$). Если считать, что $l = 50L_w$ — суммарная толщина квантовых ям в СКЯ, то $\alpha = 3200$ и 640 см^{-1} для МОСГЭ СКЯ и МЛЭ СКЯ соответственно. Причем первое из указанных значений совпадает по порядку величины со значением коэффициента поглощения в СКЯ, когда вектор электрического поля подающего излучения поляризован перпендикулярно слоям СКЯ [1]. Таким образом, можно предположить, что в МОСГЭ СКЯ даже при неблагоприятной поляризации излучение испытывает сильное поглощение, т.е. селективность по отношению к поляризации подавляется.

В случае образцов с ДР выражение для квантовой эффективности можно приближенно записать как $\eta \approx (1 - R_1)(\alpha l + \alpha_1 l_1)$. Первый множитель в скобках учитывает отражение от фронтальной поверхности фотоприемника. Во втором множителе в скобках первое слагаемое учитывает поглощение излучения за один проход через активную область (т.е. при нормальном падении), а второе слагаемое — поглощение излучения в активной области после рассеяния на ДР. Для образца МОСГЭ СКЯ на основании сделанного предположения

о подавлении в нем селективности чувствительности по отношению к поляризации можно считать, что $\alpha \approx \alpha_1$. Величина $l_1 \approx l / \cos \varphi$, где φ — угол первого порядка дифракции на ДР, равный примерно 40° для длины волны 8.5 мкм. Ввиду узости спектра фоточувствительности СКЯ можно приближенно считать, что значительная часть рассеянного на ДР излучения будет распространяться под этим углом. Тогда для квантовой эффективности образца МОСГЭ СКЯ получим $\eta \approx 0.5(al + al/0.77) = 1.15al$. Таким образом, в условиях сделанных предположений увеличение квантовой эффективности в данном образце не должно быть значительным, что и подтверждено экспериментально. Несколько большее значение экспериментальной величины связано, по-видимому, с вкладом длинноволновой части спектра сигнального излучения, которая рассеивается под большими углами и поглощается после дифракции на больших расстояниях l_1 . Для образца МЛЭ СКЯ с ДР можно использовать то же выражение для η , что и в случае образца МОСГЭ СКЯ с некоторым уточнением: $\eta \approx 0.5(al + \alpha_1 l / 0.77)$, где α_1 может значительно (в зависимости от угла дифракции) превышать $\alpha = 640 \text{ см}^{-1}$, которое наблюдается при нормальном падении излучения (см. формулу (3) в [1]). В нашем случае увеличение α составило 3.8 раза и достигло 2433 см^{-1} . Учитывая, что период решетки не оптимизирован, можно ожидать увеличения α вплоть до значений, полученных в случае с образцом МОСГЭ СКЯ, за счет подбора параметров ДР.

На основании полученных экспериментальных результатов и их анализа можно сделать следующие выводы.

1. Образцы ФП СКЯ, имеющие номинально одинаковую конструкцию, но отличающиеся способами выращивания — МЛЭ и МОСГЭ, имеют различную чувствительность по отношению к нормально падающему излучению: в образцах, выращенных МОСГЭ, она значительно выше.

2. Указанные образцы имеют различную чувствительность по отношению к излучению, имеющему составляющую вектора электрического поля, перпендикулярную слоям СКЯ. Образцы, выращенные МЛЭ, обладают большей чувствительностью к такому излучению.

3. На основе полученных результатов можно сделать предположение, что селективность фоточувствительности по отношению к поляризации излучения в образцах, выращенных МОСГЭ, заметно подавляется.

4. Одной из наиболее вероятных причин указанного эффекта, которая указывалась ранее [5], может быть возникновение на границах барьер-яма встроенного электрического поля, связанного с проникновением в барьеры примеси (кремния) в процессе выращивания СКЯ (в большей степени в случае МОСГЭ) и ее ионизации при охлаждении СКЯ. Расчеты, сделанные с использованием модели контакта металл-полупроводник [8] на границе барьер-яма, при уровне легирования барьера около 10^{18} см^{-3} дали величину поля в барьере свыше 10^5 В/см . Для подтверждения сделанных предположений необходимы дальнейшие исследования.

4. Заключение

Проведены сравнительные экспериментальные исследования фоточувствительности образцов фотоприемников, изготовленных из СКЯ, выращенных методами МЛЭ и МОСГЭ. Установлено, что образцы, выращенные МОСГЭ, имеют значительно большую фоточувствительность по отношению к нормально падающему излучению, чем их аналоги, выращенные МЛЭ, что может быть связано с подавлением селективности чувствительности по отношению к поляризации излучения в образцах, выращенных МОСГЭ. На основе анализа экспериментальных результатов сделано предположение, что причиной указанного эффекта может быть возникновение на границах барьер-яма встроенного электрического поля, связанного с проникновением кремния в барьеры в процессе выращивания СКЯ (в большей степени в случае МОСГЭ) и ее ионизации при охлаждении СКЯ.

Список литературы

- [1] B.F. Levine. J. Appl.Phys., **74** (8), R1–R81 (1993).
- [2] Y. Zhang, N. Baruch, W.I. Wang. Electr. Letters, **29** (2), 213 (1993).
- [3] M.Z. Tidrow, J.C. Chiang, S.S. Li, K. Bacher. Proc. of SPIE, **3061**, 772 (1997).
- [4] S.Y. Wang, C.P. Lee. Appl. Phys. Lett., **71** (1), 119 (1997).
- [5] В.Б. Куликов, Г.Х. Аветисян, Л.М. Василевская, И.Д. Залевский, И.В. Будкин, А.А. Падалица. ФТП, **38** (2), 218 (2004).
- [6] А.Я. Шик. ФТП, **20** (9), 1598 (1986).
- [7] *Приборы с зарядовой связью*, под ред. Д.Ф. Барба (М., Мир, 1982) с. 93.
- [8] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1, с. 261.

Редактор Т.А. Полянская

Normal incidence photoresponsivity of multiple quantum wells

V.B. Kulikov, V.P. Chaly*

Joint Stock Company «Central Scientific — Research Institute „Cyclone“»,
107497 Moscow, Russia

* Joint Stock Company „Svetlana–Rost“,
194156 St. Petersburg, Russia

Abstract Results of normal incidence photoresponsivity investigations of multiple quantum wells grown by means of molecular beam epitaxy and vapor phase epitaxy are presented. Structures of both types had nominally the same design. It was established that samples grown by vapor phase epitaxy have more high responsivity in this case. Samples grown by molecular beam epitaxy are more sensitive to radiation which has a component of electric field vector perpendicular to layers of structure. On the basis of obtained results it was supposed that polarisation selectivity of responsivity is considerably suppressed in vapor phase grown samples. The built-in electric field on the barrier-well boundary which is due to penetration of impurity in barrier during structure grows is considered as more possible reason of such effect.