

Влияние качества гетерограниц на спектры циклотронного резонанса гетероструктур InAs/(AlGa)Sb

© Ю.Б. Васильев, С.Д. Сучалкин, С.В. Иванов, Б.Я. Мельцер, А.Ф. Цацульников,
П.В. Неклюдов, П.С. Копьев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 15 апреля 1997 г. Принята к печати 22 апреля 1997 г.)

Проведены измерения циклотронного резонанса в одиночных квантовых ямах InAs–AlGaSb II типа, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии при различных условиях роста. Обнаружены квантовые осцилляции в спектрах циклотронного поглощения в образцах InAs–GaSb, которые объясняются рассеянием на короткодействующем потенциале, обусловленном шероховатостью гетерограницы. Предлагается новый метод оценки качества гетерограницы, основанный на измерении спектров циклотронного резонанса.

Введение

Известно, что свойства гетероструктур в значительной степени определяются качеством поверхности гетерограниц. Например, в гетероструктурах AlGaAs/GaAs с квантовыми ямами (КЯ) качество гетерограницы образовавшейся в результате осаждения GaAs на поверхности AlGaAs, значительно хуже, чем в случае, когда AlGaAs выращивается на поверхности GaAs, что и обуславливает, например, худшие транспортные характеристики двумерного электронного газа в модулированно-легированных структурах с КЯ или сверхрешетками по сравнению с одиночными гетеропереходами. Поскольку наличие гетерограницы приводит к появлению дополнительного механизма рассеяния носителей заряда на шероховатостях ее поверхности, измерения подвижности носителей в КЯ могут быть использованы для оценки качества границы (см., например, [1]).

В настоящей работе нами предлагается новый метод оценки качества поверхности гетерограниц путем анализа спектров циклотронного резонанса (ЦР). В отличие от других методов он позволяет оценить продольные размеры неоднородностей на гетерогранице и определить основной тип рассеивателей в структуре, что оказывается чрезвычайно полезным там, где люминесцентная характеристика затруднена, как, например, в структурах InAs/GaSb II типа с разрывом запрещенной зоны на гетерогранице. Известно, что в случае короткодействующих рассеивателей форма линии ЦР имеет характерные особенности в виде квантовых осцилляций [2]. Ранее эти осцилляции наблюдались в системе двумерного электронного газа на поверхности Si [3], однако о наблюдении подобной формы ЦР в других материалах не сообщалось. Мы обнаружили квантовые осцилляции при исследовании субмиллиметрового поглощения в одиночной квантовой яме GaSb–InAs–GaSb. Были выполнены исследования, которые позволяют связать форму линии ЦР с наличием мелкоразмерных шероховатостей на поверхности гетерограницы.

В качестве объекта исследования выбрана система InAs/AlGaSb, в которой можно реализовать различный тип связи на гетерогранице (In–Sb или (Al)Ga–As) в зависимости от способа и условий ее формирования.

Методика эксперимента

Образцы представляют собой структуры с одиночными КЯ GaSb–InAs–GaSb и AlSb–InAs–AlSb, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках GaAs(001). Методика выращивания толстой (~ 2 мкм) буферной структуры GaSb/Al(Ga)Sb подробно описана в работе [4]. Все структуры выращивались при температуре подложки 500°C , что существенно затрудняет формирование однородной гетерограницы типа In–Sb, практически независимо от материала барьера, вследствие сильного переиспарения Sb из напряженного граничного монослоя InSb [5]. Гетерограницы в структуре InAs/GaSb формировались путем переключения потоков элементов V группы на поверхность GaSb при минимальном (3 с) времени выдержки под потоком As до включения потока In. Во всех остальных структурах с InAs/AlSb на поверхности AlSb специально выращивался один монослой InSb при более чем шестикратном превышении потока атомов Sb над потоком атомов In, после чего потоки Sb и As переключались одновременно.

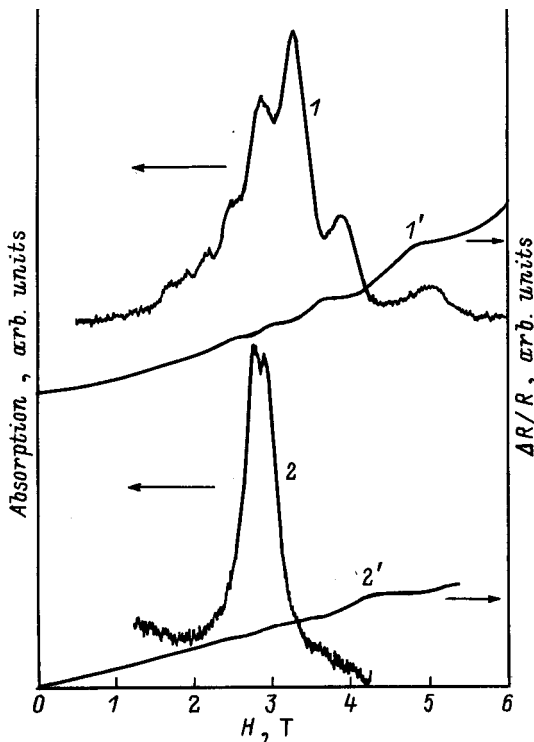
Измерения ЦР проводились при фиксированной длине волны генерации лазера ($\lambda = 119$ мкм) с помощью развертки магнитного поля, направленного перпендикулярно к поверхности образцов. Все образцы стачивались на клин, чтобы избежать интерференции в подложке. Дополнительно образцы, как правило, снабжались электрическими контактами для измерений осцилляций магнитосопротивления.

Измерения концентрации и подвижности электронов в двумерном канале InAs проводились с помощью эффекта Холла в температурном диапазоне $4.2 \div 300$ К.

Результаты и обсуждение

На рисунке представлены спектры ЦР, полученные для 2 одиночных квантовых ям InAs с различным образом сформированными гетерограницами. Верхней кривой соответствуют измерения для структуры с барьерами из GaSb, а нижней — из AlSb. Обе ямы имеют практически одинаковую ширину (примерно 20 нм), близкие значения поверхностной концентрации носителей в двумерном InAs-канале (около $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и подвижности при 300 К ($\sim 2.5 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$). Однако значения низкотемпературной подвижности носителей в структуре InAs/AlSb ($2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [6]) более чем в 3 раза выше, чем в структуре InAs/GaSb, что, вероятнее всего, связано с лучшим качеством гетерограницы. В спектрах ЦР также наблюдаются значительные отличия не только в ширине, но и в форме линии циклотронного резонанса.

Верхней кривой на рисунке соответствует характерная форма линии, четко указывающая на квантовые осцилляции. При этом особенности на линии ЦР соответствуют магнитным полям, при которых уровень Ферми совпадает с одним из уровней Ландау в согласии с теоретическими предсказаниями Андо [2]. Это подтверждается также и измерениями осцилляций магнитосопротивления, выполненными по двухконтактной методике одновременно с измерениями поглощения. Видно, что осцилляции на линии ЦР коррелируют с осцилляциями магнитосопротивления. Контрольные измерения в наклонных



Спектры циклотронного резонанса (1, 2) при $\lambda = 119 \text{ мкм}$ и зависимости магнитосопротивления $\Delta R/R$ от магнитного поля H (1', 2') для квантовых ям: 1, 1' — GaSb-InAs-GaSb; 2, 2' — AlSb-InAs-AlSb.

магнитных полях показали, что квантовые осцилляции в поглощении смещаются одинаково с осцилляциями магнитосопротивления и в соответствии с ожидаемым поведением двумерного электронного газа — по закону косинуса угла наклона.

Напротив, для структуры с КЯ типа InAs/AlSb никаких квантовых осцилляций на линии ЦР не видно, а ширина линии значительно меньше, чем для верхней кривой. Расщепление пика (нижняя кривая на рисунке) не связано с характером заполнения уровней Ландау, его природа обсуждается в другой работе [7].

Обсудим более подробно причину квантовых осцилляций. Обычно в сильных магнитных полях свойства системы зависят от распределения носителей по уровням Ландау. Дополнительно при исследовании ЦР важную роль играет характерный размер рассеивающего потенциала. Как отмечено в обзоре [2], это влияние наиболее выражено для случая $d \ll l$, где d — характерный размер рассеивателей, а $l = (\hbar c / eH)^{1/2}$ — магнитная длина. При выполнении ряда условий, когда в пределах линии ЦР уровень Ферми несколько раз пересекает уровни Ландау, в спектре ЦР может возникнуть осцилляционная структура. Возникновение осцилляций есть следствие зависимости коэффициента поглощения двумерного электронного газа от плотности состояний на уровне Ферми. Как и в случае обычных осцилляций магнитосопротивления, эти осцилляции определяются концентрацией носителей и имеют характерный период по оси $1/H$. В соответствии с предсказаниями теории [2] в области меньших магнитных полей $\omega_c < \omega_0$ (ω_0 — частота зондирующего излучения, ω_c — циклотронная частота) максимумы поглощения совпадают с максимумами магнитосопротивления, в то время как на краю линии поглощения, соответствующем большому магнитному полю ($\omega_c > \omega_0$), максимумы магнитосопротивления соответствуют минимумам в поглощении. Как было показано в [2], наличие квантовых осцилляций свидетельствует о том, что основным типом рассеяния электронов в данной системе является рассеяние на короткодействующем потенциале. Источником такого рода рассеивающего потенциала в первую очередь могут служить шероховатости гетерограницы с характерным размером, меньшим магнитной длины. Мы можем примерно оценить характерные размеры этих шероховатостей, исходя из того, что при данных магнитных полях $H \sim 3 \text{ Тл}$ магнитная длина l равна 15 нм. Данная оценка дает длину порядка нескольких десятков ангстрем. Очевидно, что более точная оценка размеров неоднородностей требует дополнительных измерений в широком диапазоне магнитных полей. Наблюдению квантовых осцилляций в поглощении в системе InAs/GaSb во многом способствует достаточно большая концентрация электронов в КЯ (более 10^{12} см^{-2}), при которой особенно велика роль мелкогабаритных шероховатостей [8].

Столь существенное различие в спектрах ЦР двух структур, хорошо согласующееся с результатами низкотемпературных холловских измерений, можно объяс-

нить нарушением планарности и, вероятно, локальным изменением типа связи на гетерогранице InAs/GaSb в результате реакции замещения атомов Sb атомами As, существенно ускоряющейся при высоких температурах [9], тогда как в структуре InAs/AlSb тип связи на гетерогранице — преимущественно In–Sb [6], при существенно лучшей планарности.

Кроме рассеяния на шероховатостях поверхности другой возможной причиной возникновения квантовых осцилляций в структурах InAs–GaSb могло бы быть наличие близко расположенного слоя дырок в валентной зоне GaSb. Действительно, экранированный дырочный газ имеет свойства короткодействующего рассеивателя, что в принципе может приводить к квантовым осцилляциям в поглощении. Были проведены дополнительные эксперименты на серии образцов InAs/AlSb/GaSb, в которых ширина барьера между электронами в InAs и дырками в GaSb варьировалась в пределах от 2 до 30 нм, гетерограница InAs/AlSb формировалась путем выращивания одного монослоя InSb при большом избыточном давлении Sb. Однако квантовые осцилляции ни на одном из этих образцов не наблюдались, что позволяет исключить дырочный слой как причину появления осцилляций в поглощении. Отметим, что ранее осцилляции в поглощении наблюдались на гетеропереходах GaSb/InAs [10], причем авторы интерпретировали причину таких осцилляций как межподзонные переходы между уровнями Ландау, находящимися в зоне проводимости в InAs и уровнями Ландау в валентной зоне GaSb.

Следует отметить, что отсутствие квантовых осцилляций в структурах с AlSb-барьером могло бы быть связано не с улучшением качества гетерограницы, а с меньшей вероятностью рассеяния на шероховатостях за счет большой высоты AlSb-барьеров. Однако согласно нашим оценкам следует, что высота барьеров не оказывает существенного влияния на вероятность рассеяния на шероховатостях гетерограницы в отличие, например, от ширины ямы.

Таким образом, мы впервые наблюдали квантовые осцилляции в спектре циклотронного резонанса в одиночной квантовой яме InAs/GaSb. Предложен новый метод исследования качества поверхности гетерограницы путем измерений спектров ЦР. Получены предварительные данные, которые позволяют оценить продольные размеры рассеивателей на границе. Для повышения точности оценки требуются более подробные исследования при различных магнитных полях.

Работа была выполнена при поддержке Japan Society for the Promotion of Science, Международной ассоциации INATS — грант 94-1172; Российского фонда фундаментальных исследований — гранты 97-02-18355, 97-02-18175 и РФФИ-ДФГ — грант 96-02-00223G.

Список литературы

- [1] W.C. Mitchel, G.J. Brown, I. Lo, S. Elharmi, M. Ahoujja, K. Ravindran, R.S. Newrock, M. Razeghi, X. He. *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 1578 (1994).
- [2] T. Ando. *J. Phys. Soc. Japan*, **38**, 989 (1975).
- [3] G. Abstreiter, J.P. Kotthaus, J.F. Koch, G. Dorda. *Phys. Rev. B*, **14**, 2480 (1976).
- [4] S.V. Ivanov, P.D. Altukhov, T.S. Argunova, A.A. Bakun, A.A. Boudza, V.V. Chaldyshev, Yu.A. Kovalenko, P.S. Kop'ev, R.N. Kutt, B.Ya. Meltser, S.S. Ruvimov, S.V. Shaposhnikov, L.M. Sorokin, V.M. Ustinov. *Semicond. Sci. Technol.*, **8**, 347 (1993).
- [5] П.В. Неклюдов, С.В. Иванов, Б.Я. Мельцер, П.С. Копьев. *ФТП* 2157 (1997).
- [6] P.D. Wang, N.N. Ledentsov, C. Sotomayor-Torres, S.V. Ivanov, B.Ya. Meltser, P.S. Kop'ev. *Sol. St. Commun.*, **91**, 361 (1994).
- [7] Yu. Vasilyev, H. Kobori, T. Ohyama, S. Suchalkin, S. Ivanov, P. Kop'ev, B. Meltser. *Phys. Rev. B* (to be published).
- [8] Т. Андо, А. Фаулер, Ф. Стерн. *Электронные свойства двумерных систем* (М., Мир, 1985).
- [9] D.H. Chow, R.H. Miles, J.R. Soderstrom, T.C. McGill. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **8**, 710 (1990).
- [10] Y. Guldner, J.P. Vieren, P. Voisin, M. Voos, J.C. Maan, L.L. Chang, L. Esaki. *Sol. St. Commun.*, **41**, 755 (1982).

Редактор Т.А. Полянская

Interface-related effects in cyclotron resonance spectra of InAs/(AlGa)Sb heterostructures

Yu.B. Vasilyev, S.D. Suchalkin, S.V. Ivanov, B.Ya. Meltser, A.F. Tsatsul'nikov, P.V. Necludov, P.S. Kop'ev

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract Cyclotron resonance (CR) measurements are performed on type-II InAs–AlGaSb single quantum well structures grown by molecular beam epitaxy under different growth conditions. Quantum oscillations in CR absorption are observed in InAs–GaSb samples and are interpreted to be due to short-ranged scattering on interfacial roughness. We propose a novel method based on CR measurement to evaluate the interface quality.