

Московский Государственный Университет  
имени М. В. Ломоносова  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра общей физики

**Фурье-анализ спектров фотоотражения многослойных  
структур на основе соединений арсенида галлия**

Выпускная квалификационная работа бакалавра  
Труфанова Евгения Андреевича

Научный руководитель:  
к.ф-м.н., доцент Боков П.Ю.

МОСКВА, 2013

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ГЛАВА 1. СПЕКТРОСКОПИЯ ФОТООТРАЖЕНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ .....	5
1.1 ЭФФЕКТ ФРАНЦА-КЕЛДЫША .....	5
1.2 ВИДЫ СПЕКТРОВ ФОТООТРАЖЕНИЯ .....	6
1.3 ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ОСЦИЛЛЯЦИЙ ФРАНЦА-КЕЛДЫША .....	10
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ .....	14
ГЛАВА 3. ФУРЬЕ-АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ФОТООТРАЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЙ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ .....	19
2.1 СПЕКТРЫ ФОТООТРАЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ .....	19
2.2 МОДЕЛИРОВАНИЕ .....	23
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....	27
ЛИТЕРАТУРА .....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ .....	32

## Введение

Электрофизические свойства полупроводниковых приборов определяются их легированием. Особый интерес представляют структуры с дельта-легированными слоями [1]. В этих системах примесь локализована, в идеале, в слое толщиной несколько нм, что обеспечивает пространственное разделение носителей заряда и ионизированной примеси. Это способствует улучшению технических параметров изготавливаемых полупроводниковых приборов.

Область локализации примеси при дельта-легировании, например Si или Be в GaAs, формирует потенциальные ямы для электронов или дырок, что приводит к формированию двумерного электронного или дырочного газов. В такой зарядово-индуцированной потенциальной яме обычно формируется несколько подуровней размерного квантования [2].

При разработке и создании приборов опто- и наноэлектроники на основе гетероструктур с квантовыми ямами последние используют в роли «накопителя» носителей (например – это область формирования излучения светодиода или канал полевого транзистора). Поэтому, в качестве области локализации примеси чаще всего используют барьеры, которые подвергают модулированному или дельта легированию. Такой подход обеспечивает туннелирование носителей из легированного барьера в область квантовой ямы, где они могут двигаться не испытывая рассеяния на ионизированной примеси [3]. Это должно приводить как к увеличению подвижности носителей, так и к уменьшению вероятности безызлучательной рекомбинации на ионизированной примеси. Последнее оказывается принципиальным при создании новых электронных полупроводниковых приборов: от этого зависит и быстродействие транзисторов и квантовая эффективность светодиодов и лазеров [4].

Современные технологии изготовления полупроводниковых структур требуют развития методов их диагностики. В первую очередь речь идет о развитии бесконтактных методов, которые возможно использовать даже на этапе изготовления структур. Особую роль среди средств диагностики отводят методам модуляционной спектроскопии: часть технологического оборудования уже снабжается приставками для измерения фотомодуляционных спектров [5]. В то же время, многообразие изготавливаемых полупроводниковых структур и сложность интерпретации модуляционных спектров требует проведения дополнительных исследований и, в первую очередь, разработки методов анализа модуляционных спектров.

Осцилляторный характер модуляционных спектров делает их интересными для анализа с помощью преобразования Фурье. Использование преобразования Фурье позволяет помимо модуля вектора напряженности встроенного электрического поля определять соотношение между приведенными эффективными массами носителей в исследуемой структуре.

В настоящей выпускной работе приводятся результаты Фурье-анализа фотомодуляционных спектров полупроводниковых структур AlGaAs с одной и двумя областями легирования. Определен модуль вектора напряженности электрического поля для исследуемых образцов.

## Глава 1. Спектроскопия фотоотражения легированных полупроводников

В последнее время благодаря своей высокой информативности и чувствительности все большее распространение получают методы модуляционной спектроскопии [6]. Наибольшее распространение получили следующие методы модуляционного отражения:

- электроотражение
- фотоотражение

Методы электро- и фотоотражения [5, 7, 8] основаны на регистрации малых изменений в спектрах отражения, возникающих при модуляции встроенного электрического поля полупроводника.

В методе электроотражения внешним возмущающим воздействием является электрическое поле, которое прикладывается к образцу и приводит к модуляции диэлектрической функции [4]. Принципиальным условием реализации данного метода, является отсутствие протекания электрического тока через образец [9]. Основным механизмом, отвечающим за появление сигнала электроотражения, является изменение встроенных электрических полей в полупроводниковой структуре.

В случае фотоотражения, основа которого - эффект Франца-Келдыша, встроенное электрическое поле модулируется периодической подсветкой образца излучением с энергией квантов большей, чем ширина запрещённой зоны.

### Эффект Франца-Келдыша

Теория поглощения света полупроводниками вблизи фундаментального края  $E_g$  в присутствии электрического поля была предложена Францем (Franz) [3] и Келдышем [9]. Они теоретически предсказали смещение края поглощения света  $E_g$  в сторону меньших энергий. Тармалингэм (Tharmalingam) [10] развил теорию поглощения Франца и

Келдыша для всего диапазона энергий. Кроме смещения края поглощения в область меньших энергий он предсказал наличие осцилляций в области  $E > E_g$ . Эти осцилляции связаны с особенностями движения электронов вблизи дна зоны проводимости и дырок вблизи потолка валентной зоны.

На Рис. 1 изображена зонная диаграмма полупроводника, помещенного в электрическое поле и волновые функции электронов  $\Psi_e$  в зоне проводимости  $E_c$  и дырок  $\Psi_h$  в валентной зоне  $E_v$ . Экспоненциальное затухание волновых функций в запрещенной зоне приводит к сдвигу края поглощения в низкоэнергетическую область и объясняет эффект Франца-Келдыша. Появление высокоэнергетических осцилляций в спектре поглощения полупроводника, помещенного в электрическое поле, связано с тем, что внутрizonное поведение носителей в таком полупроводнике описывается функциями Эйри. Последнее объясняет появление в спектрах осцилляций Франца-Келдыша.

### **Виды спектров фотоотражения**

Ещё в ранних работах Аспнеса (Aspnes) по электроотражению [11] было замечено, что вид модуляционных спектров сильно зависит от напряженности встроенного электрического поля полупроводника, которая, в свою очередь, зависит от профиля распределения и концентрации примеси. Дальнейшие исследования показали, что модуляционный спектр слабелегированных образцов ( $<10^{16} \text{ см}^{-3}$  для GaAs [12]) представляет собой линию с двумя экстремумами разных знаков. Это, так называемый, низкополевой случай. Для образцов GaAs с концентрацией носителей  $>10^{17} \text{ см}^{-3}$  спектр состоит из множества осцилляций, называемых осцилляциями Франца-Келдыша. В этом случае форму спектральных линий в модуляционном спектре называют среднеполевой.

Было установлено, что период осцилляций зависит от напряженности встроенного электрического поля полупроводника.

В низкополевом случае спектр фотоотражения описывают формулой Аспнеса [11]:

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \operatorname{Re} \left[ A \cdot e^{i\varphi} \cdot (E - E_g + i\Gamma)^{-m} \right], \quad (1)$$

где  $A$ ,  $\varphi$  - амплитудный и фазовый параметры,  $E$  - энергия зондирующего излучения,  $E_g$  - положение спектральной особенности,  $\Gamma$  - параметр уширения,  $m$  - параметр, определяемый видом критической точки и порядком производной диэлектрической функции  $\epsilon(E)$  по энергии.

Из анализа экспериментальных данных было установлено, что если  $\hbar\Omega > 3\Gamma$  (где  $\hbar\Omega$  - электрооптическая энергия – энергия электрона в электрическом поле,  $\Gamma$  – параметр уширения в формуле Аспнеса (1)), то спектр фотоотражения представляет собой среднеполевую форму с осцилляциями Франца-Келдыша (Рис. 3). В ином случае наблюдается низкополевой спектр фотоотражения, который в области края поглощения представляет собой характерную структуру с двумя экстремумами разных знаков.

В среднеполевом случае спектр фотоотражения состоит из осцилляций Франца-Келдыша. Форма спектральных особенностей  $\Delta R/R$  описывается в терминах электрооптических функций Эйри:

$$\frac{\Delta R}{R}(E) = \alpha_{lh} \cdot G \left[ \frac{(\hbar\omega - E_g)}{\hbar\Omega_{lh}} \right] + \alpha_{hh} \cdot G \left[ \frac{(\hbar\omega - E_g)}{\hbar\Omega_{hh}} \right], \quad (2)$$

где  $\alpha_{hh}$ ,  $\alpha_{lh}$  – коэффициенты, определяющие вклад в модуляционный спектр межзонных переходов с участием подзон тяжелых (hh) и легких дырок (lh),  $G(x)$  – определяется через функции Эйри  $Ai$ ,  $Bi$  и их производные:

$$G(x) = \pi [Ai'(x) \cdot Bi'(x) - x \cdot Ai(x) \cdot Bi(x)] + \sqrt{x} \cdot H(x) + i \{ \pi [Ai'^2(x) - x \cdot Ai^2(x)] - \sqrt{-x} \cdot H(-x) \}, \quad (3)$$

где  $H(x)$  – функция Хевисайда,  $\hbar\Omega$  – электрооптическая энергия (энергия электрона в электрическом поле):

$$\hbar\Omega = \left( \frac{e^2 \cdot E_s^2 \cdot \hbar^2}{8 \cdot \mu^3} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

здесь  $\mu$  – приведенная межзонаная эффективная масса:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}, \quad (5)$$

где  $m_e^*$ ,  $m_h^*$  – эффективные массы электрона в зоне проводимости и дырки в валентной зоне,  $E_s$  – модуль вектора напряженности встроенного поля полупроводника,  $e$  – заряд электрона.

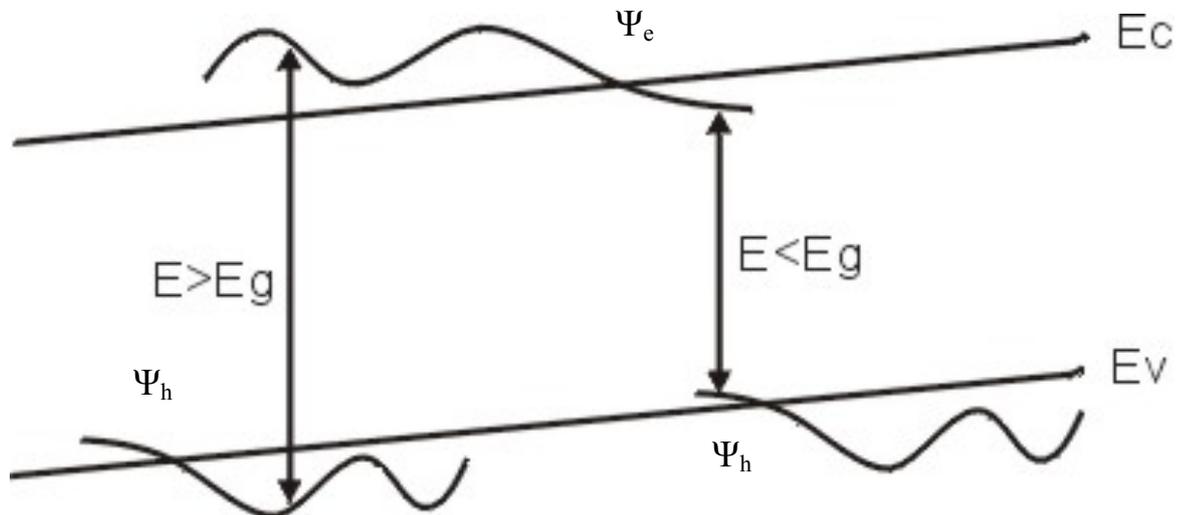


Рис. 1. Зонная диаграмма полупроводника, помещенного в электрическое поле. Волновые функции электронов  $\Psi_e$  и дырок  $\Psi_h$  в полупроводнике, поясняющие эффект Франца-Келдыша ( $E < E_g$ ) и образование осцилляций в высокоэнергетической ( $E > E_g$ ) части спектра фотоотражения

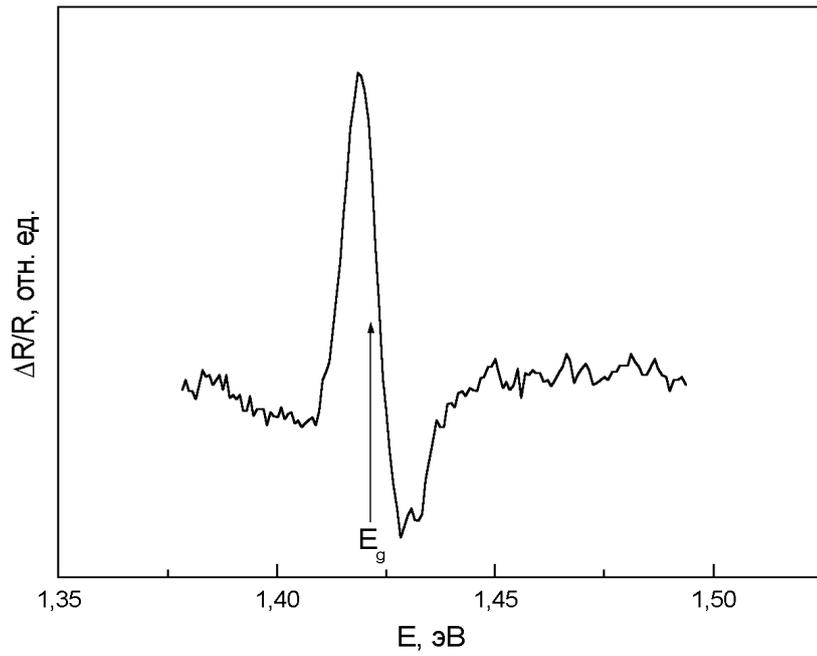


Рис. 2. Спектр фотоотражения полуизолирующей ( $n < 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) подложки GaAs (100) [17]

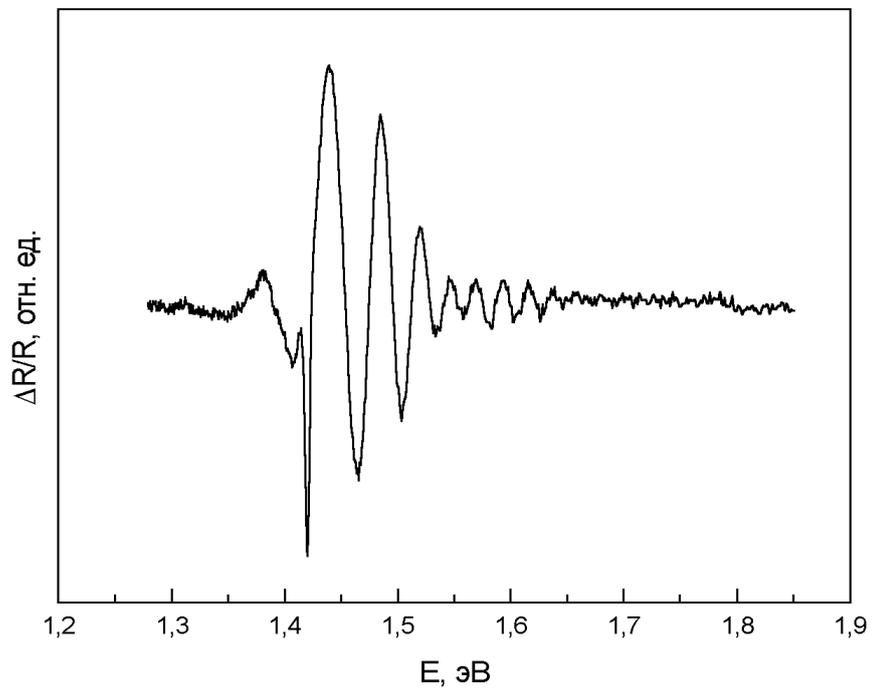


Рис. 3. Спектр фотоотражения легированной пленки n-GaAs (100),  $n=4.3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Биения осцилляций Франца-Келдыша вызваны наложением сигналов фотоотражения, связанных с переходами из подзон тяжелых и легких дырок расщепленной валентной зоны GaAs [17]

Непосредственный анализ среднеполевых спектров с использованием представления через электрооптические функции (2 –3) сложен. Аспнес (Aspnes) и Штудна (Shtudna) предложили следующее приближение [11]:

$$\frac{\Delta R}{R} \propto \frac{\exp\left(-\frac{2\Gamma \cdot (\hbar\omega - E_g)^{1/2}}{(\hbar\Omega)^{3/2}}\right)}{(\hbar\omega - E_g)} \cdot \cos\left[\frac{4}{3} \cdot \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{\hbar\Omega}\right)^{3/2} + \frac{\pi(d-1)}{4}\right], \quad (6)$$

где  $\hbar\omega$  - энергия зондирующего излучения,  $E_g$  - энергия фундаментального перехода,  $d$  - размерность критической точки. В случае GaAs, для прямых межзонных переходов в центре зоны Бриллюэна  $d=3$ . Как видно из (6), положения экстремумов осцилляций Франца-Келдыша  $(\hbar\omega)_j$  определяются соотношением:

$$(\hbar\omega)_j = \hbar\Omega \cdot (F_j) + E_g, \quad j=1,2,3, \quad (7)$$

где

$$F_j = \left[3 \cdot \pi \frac{j-1/2}{2}\right]^{2/3}. \quad (8)$$

### Фурье-анализ осцилляций Франца-Келдыша

Альперович и Шайблер [13] предложили использовать для анализа осцилляций Франца-Келдыша (6) преобразование Фурье. Положение  $m$  экстремумов  $E_m$  в (6) удовлетворяет соотношению:

$$\frac{4}{3} (\hbar\Omega)^{-3/2} \cdot (E_m - E_g)^{3/2} + \frac{\pi(d-1)}{4} = \pi m, \quad (9)$$

Аргумент косинуса в (6) можно представить в виде:

$$\frac{4}{3} \cdot \left(\frac{\hbar\omega - E_g}{\hbar\Omega}\right)^{3/2} = 2\pi\nu t, \quad (10)$$

где:

$$t = (E - E_g)^{3/2}, \quad (11)$$

$$\nu = \frac{2}{3\pi} \cdot (\hbar\Omega)^{-3/2} = \frac{2}{3\pi} \cdot \frac{\sqrt{2\cdot\mu}}{e\hbar E_s}, \quad (12)$$

или

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{2\cdot\mu}}{e\hbar E_s}, \quad (13)$$

Таким образом, осцилляции Франца-Келдыша (6) можно описать с помощью выражения (12), которое определяет «частоту» этих осцилляций. Как видно из (12), частота  $\nu$  зависит от модуля вектора напряженности встроенного электрического поля  $E_s$  и приведенной межзонной эффективной массы  $\mu$  (5). В Фурье-образе экспериментального спектра должны наблюдаться резкие линии на частотах  $\nu$ . При этом, если в спектр фотоотражения дают вклад области с одинаковой энергией фундаментального перехода, но с различными значениями модуля вектора напряженности встроенных электрических полей  $E_s$ , то с помощью преобразования Фурье можно разделить эти спектральные вклады. Так, использование преобразования Фурье для анализа спектров фотоотражения с биениями осцилляций, позволяет бесконтактным образом определять соотношение между эффективными массами носителей. Кроме того, преобразование Фурье является высокочастотным фильтром и позволяет исследовать спектры с большим шумовым вкладом. В то же время, Фурье анализ осцилляций Франца-Келдыша возможен лишь в том случае, когда спектр фотоотражения хорошо описывается в рамках приближения Аспнеса и Штудны (6 – 8), т.е. когда встроенное электрическое поле однородно.

На рис. 4 и рис. 5 приведем спектры дельта-легированного образца n-GaAs при  $T = 300$  К и его Фурье-образ [14]. В спектре фотоотражения наблюдается 14 пиков, что соответствует 7 периодам осцилляций. Отчетливо видно, что в области энергий 1.35-1.5 эВ и 1.5-1.7 эВ имеют место осцилляции

двух разных частот. В Фурье-образе спектра присутствует несколько пиков, из которых можно выделить выделить два в области “частот”  $40-100 \text{ эВ}^{-3/2}$ , соответствующих вкладам от легких и тяжелых дырок.

Экспериментальное определение значений напряженности встроенного поля полупроводника. Экспериментальное подтверждение формулы для эффективных масс дырок, полученной из формулы (14) из соображений того, что соотношений эффективных масс в подзонах полупроводника соответствуют разным значениям частоты и использованной в статье В. Šechavičius и J. Kavaliauskas [15]:

$$\sqrt{\frac{\mu_{hh}}{\mu_{lh}}} = \frac{\omega_{hh}}{\omega_{lh}}. \quad (14)$$

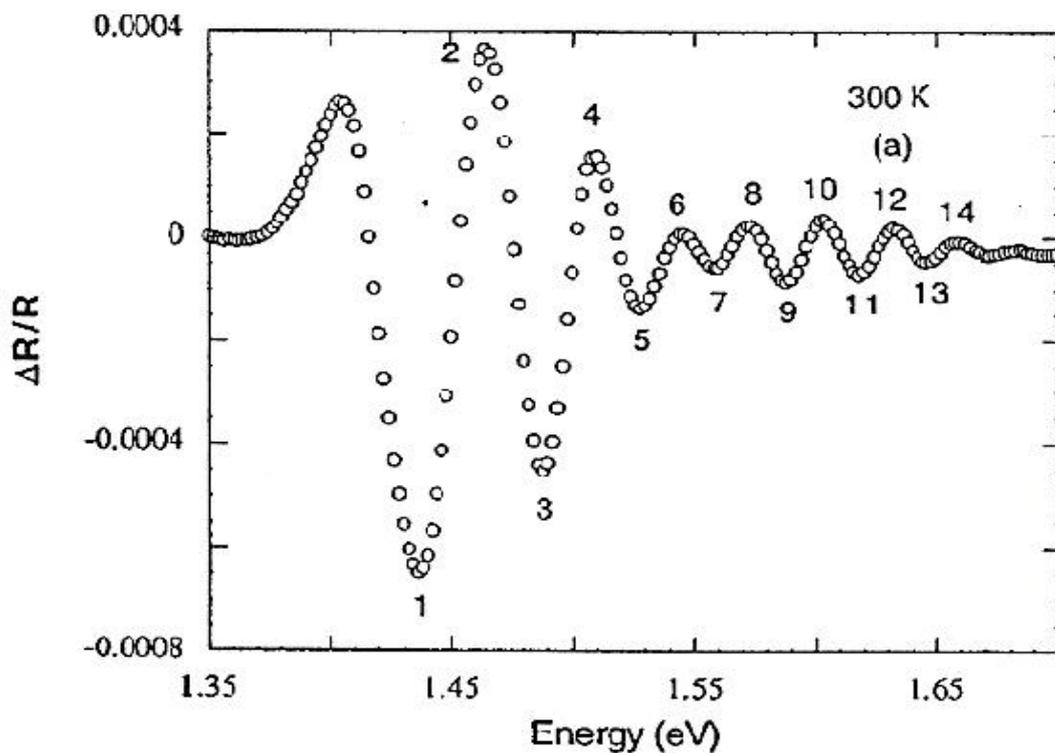


Рис. 4. Спектр ФО дельта-легированного образца при  $T=300\text{K}$

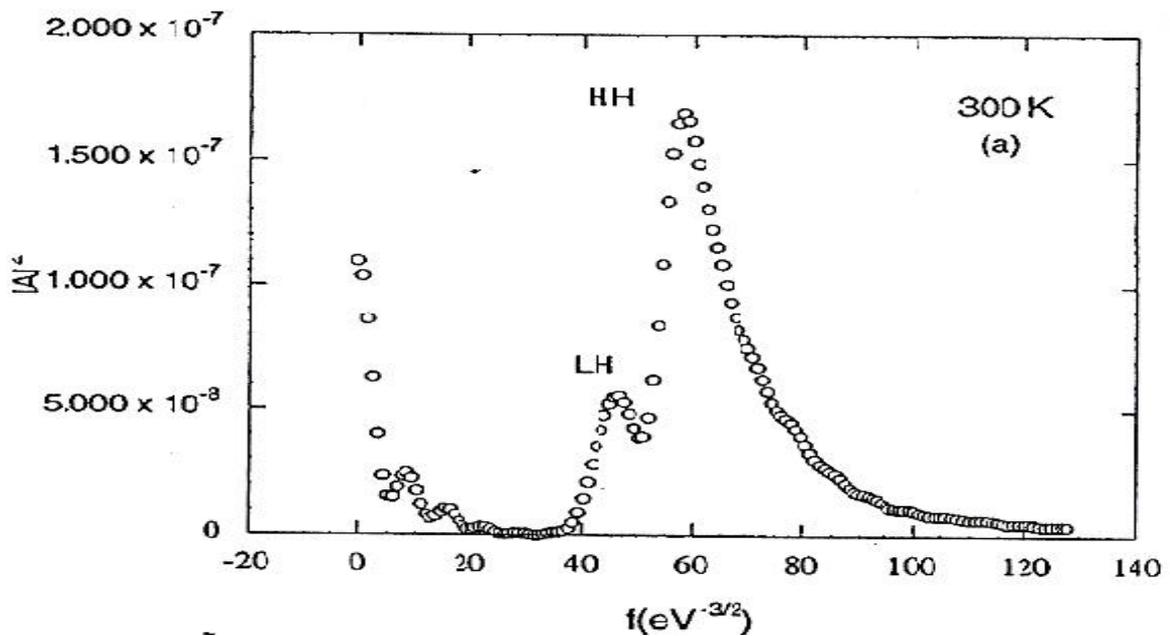


Рис. 5. Фурье-образ спектра ФО дельта-легированного образца при  $T=300\text{K}$

Однако, в реальных полупроводниковых структурах либо встроенное электрическое поле неоднородно, либо имеется несколько областей со встроенным электрическим полем разной напряженности. Это приводит к трудностям анализа модуляционных спектров с применением преобразования Фурье.

Целью настоящей работы было выявление возможности использования анализа осцилляций Франца-Келдыша с помощью быстрого преобразования Фурье для случая сильнозатухающих осцилляций, являющихся частью многокомпонентного спектра фотоотражения.

Для достижения цели рассматривались следующие задачи:

1. зарегистрировать спектры фотоотражения от один дельта и два дельта легированных образцов;
2. проанализировать полученные спектры, установить спектральную область, соответствующую дельта легированным слоям;
3. написать программу, линеаризующую спектр по энергиям, и провести моделирование для осцилляций 1, 1.5, 2, 2.5 периодов;
4. произвести быстрое преобразование Фурье для полученных спектров.

## Глава 2. Методика эксперимента и исследуемые образцы

Метод спектроскопии фотоотражения основан на регистрации малых изменений коэффициента отражения, возникающих при модуляции встроенного электрического поля полупроводника излучением с энергией квантов, превышающей ширину запрещенной зоны полупроводника.

Спектры фотоотражения регистрировались на установке на базе двойного монохроматора [16] (Рис.).

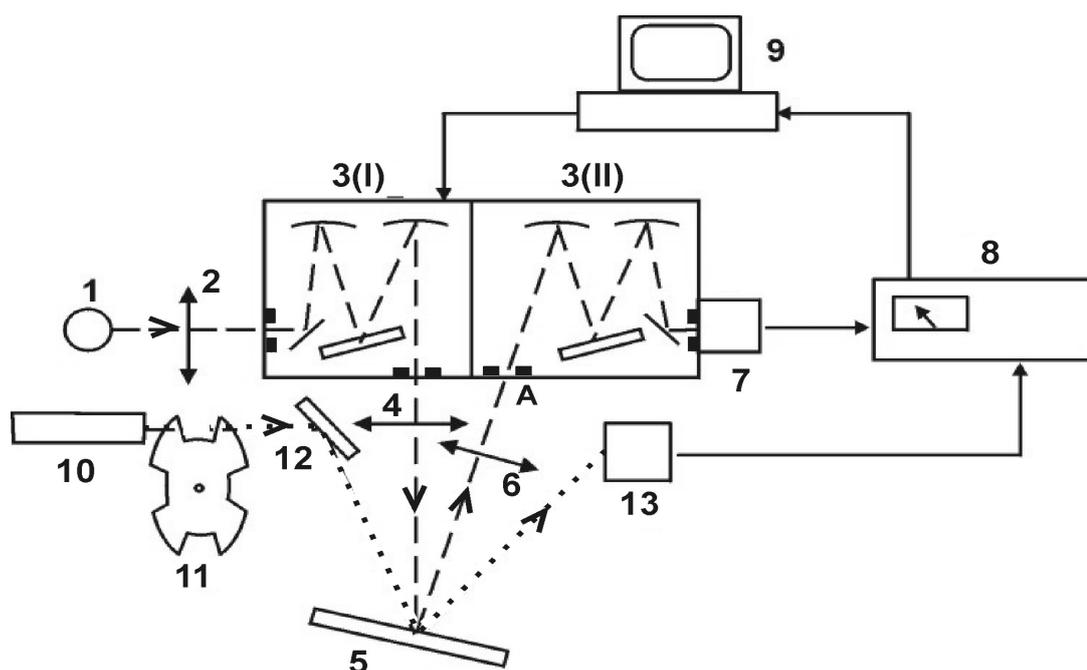


Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки для регистрации спектров фотоотражения. На рисунке обозначены: 1 - спектральная лампа, 2 - объектив, 3 - двойной монохроматор МДР-6, 4 - объектив, 5 - образец, 6 - объектив, 7 - фотоприемник с малошумящим усилителем, 8 - селективный нановольтметр Unipan-232B, 9 - компьютер с микропроцессорным модулем сопряжения, 10 - DPSS лазер, 11 - прерыватель, 12 - поворотное зеркало, 13 - фотоприемник опорного сигнала

Излучение спектральной лампы 1 (мощность 50 Вт) фокусировалось оптической системой 2 на входную щель первого монохроматора 3(I), проходило через него и оптической системой 4 направлялось на образец 5. В ту же точку образца падало излучение DPSS лазера 10, которое модулировалось механическим прерывателем 11. Частота модуляции могла

изменяться в пределах 90 – 1500 Гц. Отраженное от образца 5 зондирующее излучение (на Рис. штриховая линия) направлялось объективом 6 на входную щель А второго монохроматора 3(II) и с его выхода поступало на малошумящий фотоусилитель 7. В качестве датчика фотоусилителя применялся кремниевый фотодиод типа ФД-263.

Сигнал с усилителя поступал на синхронный детектор 8 селективного нановольтметра Unipan-232В. В качестве опорного напряжения синхронного детектора использовался сигнал с фотодиода 13, на который поступало отраженное от образца 5 модулирующее излучение от лазера 10 (пунктирная линия на Рис.). Таким образом, напряжение на выходе синхронного детектора 8 было пропорционально изменению коэффициента отражения  $R$  образца 5 на частоте модуляции. Максимальная спектральная ширина аппаратной функции монохроматора не превышала 1.5 мэВ. Для регистрации спектров фотоотражения использовался DPSS лазер мощностью 7 мВт (длина волны 532нм). Запись спектров фотоотражения осуществлялась при комнатной температуре.

Гетероструктуры на основе GaAs выращивались в институте сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН (группа Г.Б. Галиева) методом молекулярно лучевой эпитаксии на установке ЦНА-18. На полуизолирующих подложках типа АГЧП с ориентацией поверхности (100) выращивались последовательно: буферный слой GaAs и буферная сверхрешетка  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ . Далее, в случае образца с одним дельта-легированным слоем выращивался барьерный слой GaAs, квантовая яма  $In_yGa_{1-y}As$ , слой  $Al_xGa_{1-x}As$ , дельта-легированный Si, и защитный слой GaAs. Данный образец далее обозначен № 719 (рис. 7).

В случае образца с двумя дельта-легированными слоями поверх буферной сверхрешётки выращивался слой  $Al_xGa_{1-x}As$ , дельта легированный Si, квантовая яма  $In_yGa_{1-y}As$ , второй слой  $Al_xGa_{1-x}As$ , дельта легированный Si, защитный слой GaAs. Данный образец далее обозначен №313 (рис. 8).

Мольная доля  $y$  In в квантовой яме составляла  $y=0.19-0.21$ . Ширина квантовой ямы 10.5-11.0 нм. Мольная доля  $x$  Al в барьерных слоях составляла  $x=0.22-0.27$ .

Область локализации примеси Si в барьерах AlGaAs по представлениям технологов не превышала по толщине 1-3 нм.

Ближайший к поверхности барьер обоих образцов легировался кремнием до слоевой концентрации  $n=2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Дальний барьер (в образце № 313) легировался до слоевой концентрации  $n=0.4 \cdot 10^{12}$  см<sup>-2</sup>.

Для исследований были выбраны образцы серии 7xx с одним дельта-слоем и образцы серии 3xx с двумя дельта-слоями. Отличие между образцами одной серии заключалось в разном положении дельта-области относительно квантовой ямы и различной концентрацией носителей при легировании кремнием.

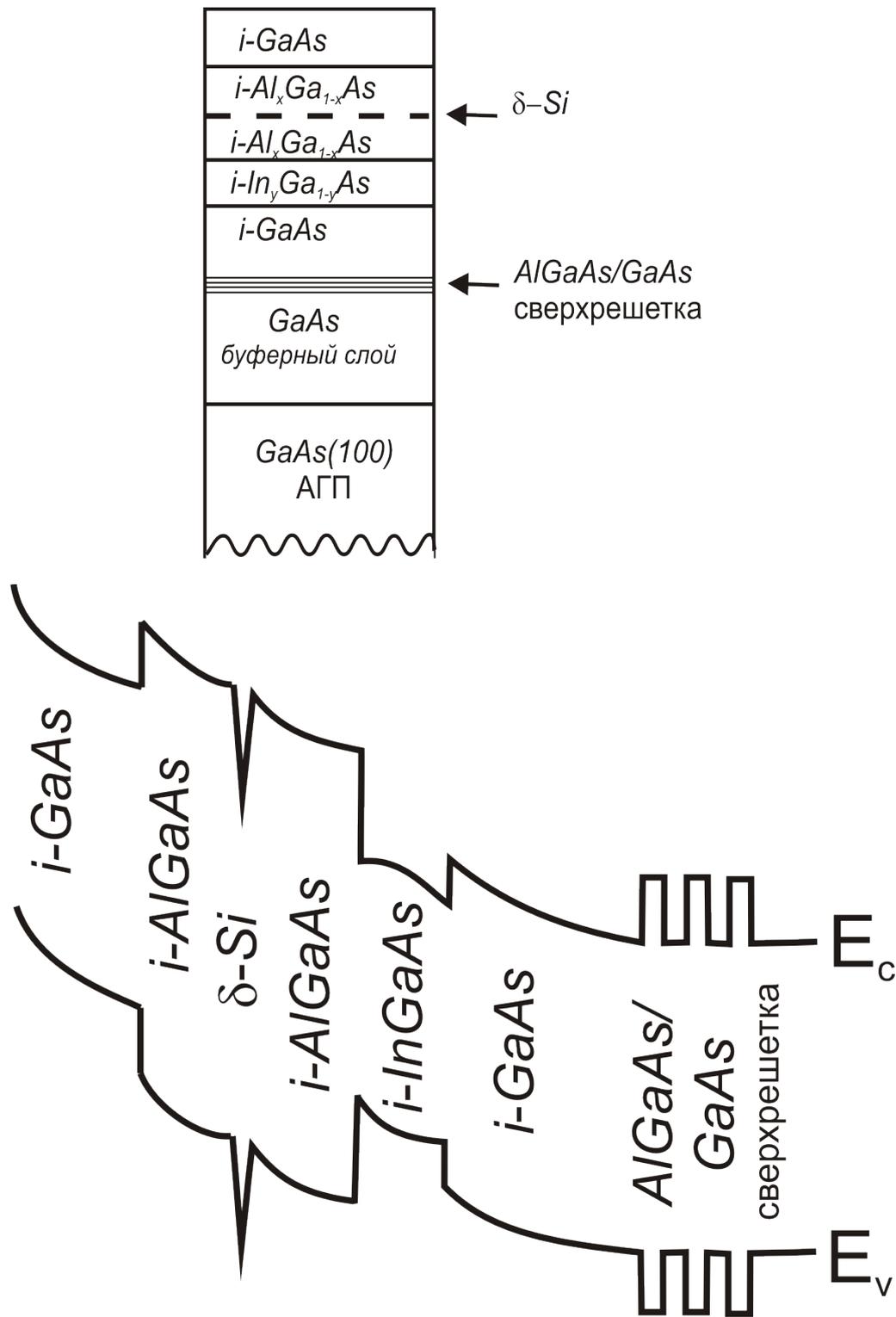


Рис. 7. Структура и зонная диаграмма дельта-легированного образца №719

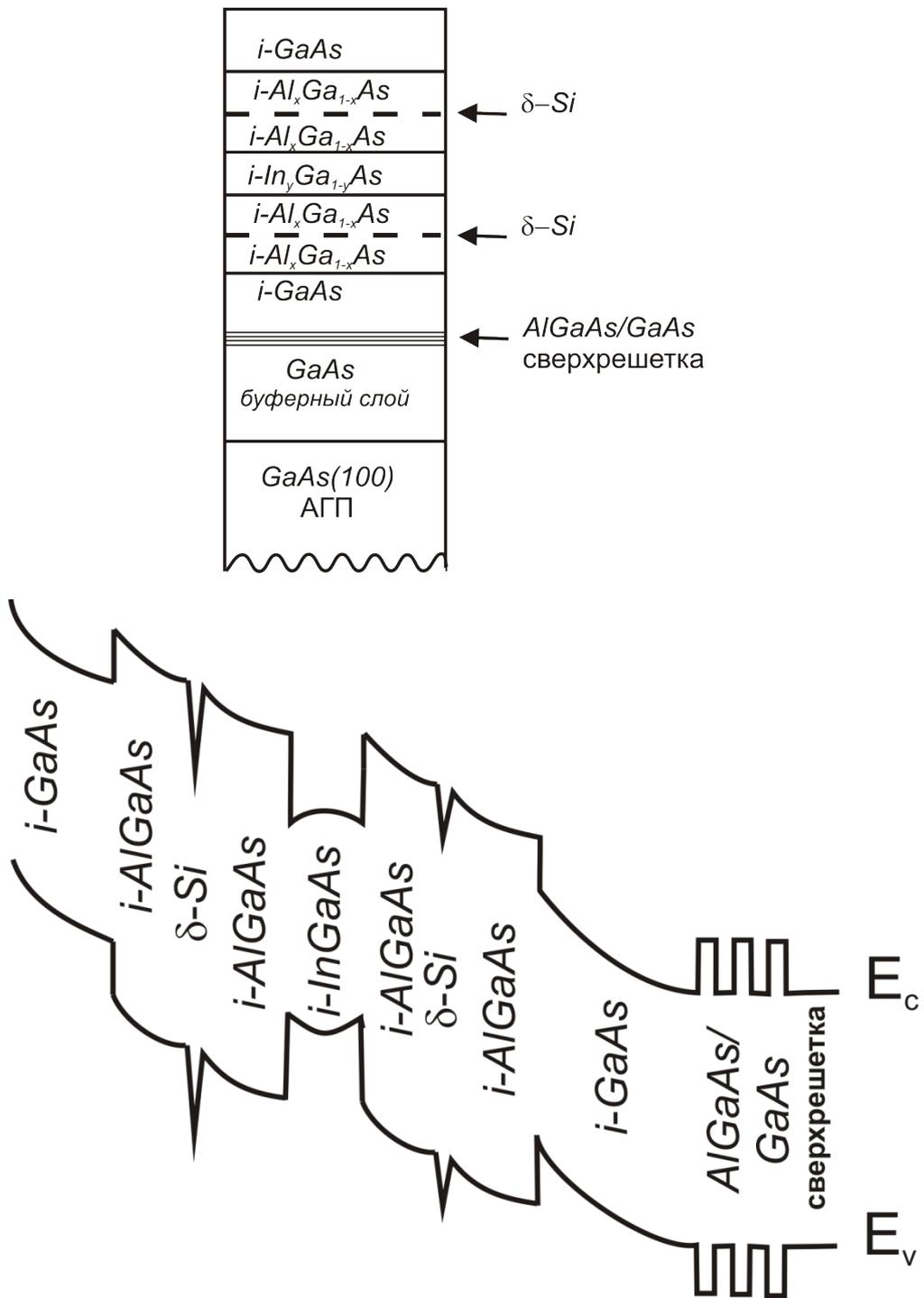


Рис. 8. Структура и зонная диаграмма дельта-легированного образца №313

### **Глава 3. Фурье-анализ спектров фотоотражения многослойных структур на основе соединений арсенида галлия**

#### **Спектры фотоотражения многослойных структур на основе арсенида галлия**

На рис. 9 приведены спектры фотоотражения от образцов 313 и 719 для сравнения. В спектре видны осцилляции от разных слоев в образцах: в диапазоне 1.3-1.5 эВ от подложки GaAs, 1.5-1.7 эВ от буферного слоя AlGaAs/GaAs и 1.7-2.3 эВ от областей один дельта и два дельта легирования AlGaAs, то есть областей осцилляций Франца-Келдыша, вызванных межзонными переходами из дельта-слоя. В данной области наблюдаются биения осцилляций 1.5-3 периодов.

На рис. 10 и рис. 11 изображены графики зависимости интенсивности от энергии (спектра) для двух серий образцов с различным легированием, полученные при помощи OriginPro 8 путем подстановки данных из файла "out\_file.txt", являющегося конечным результатом написанной программы.

В сериях образцов в области энергий 1.3-1.5 эВ можно видеть, что сигнал от подложки GaAs значительно меньше в серии 3xx, по сравнению с серией 7xx. Это связано с тем, что порядок кулоновского экранирования в образцах с двумя дельта слоями намного выше за счет большего числа носителей заряда. Вследствие слабости сигнала в данной области, модулирование проведено быть не может.

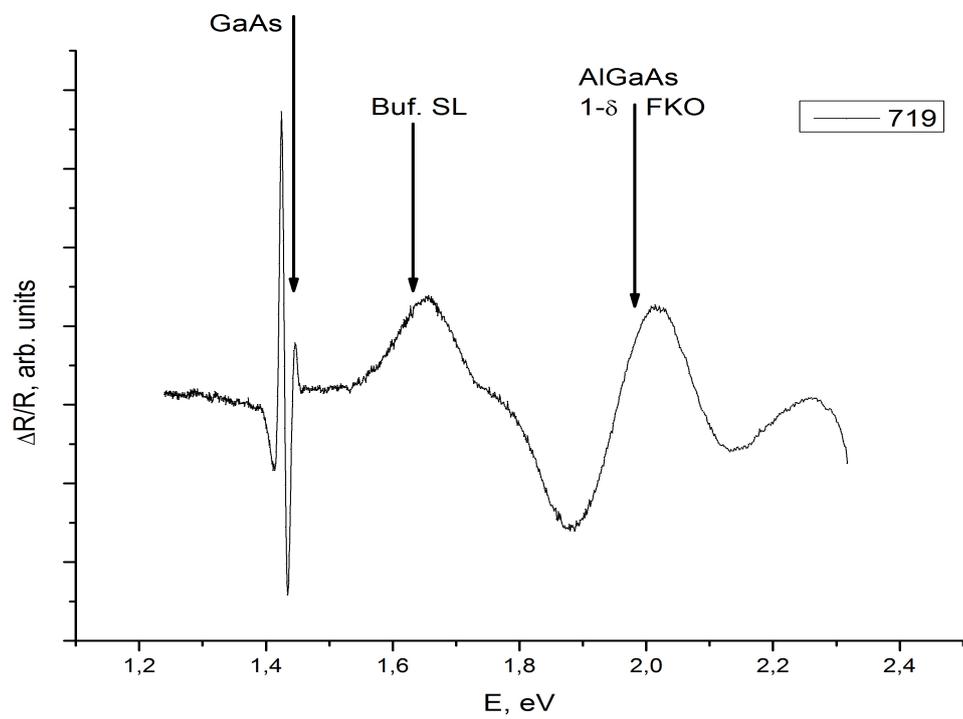
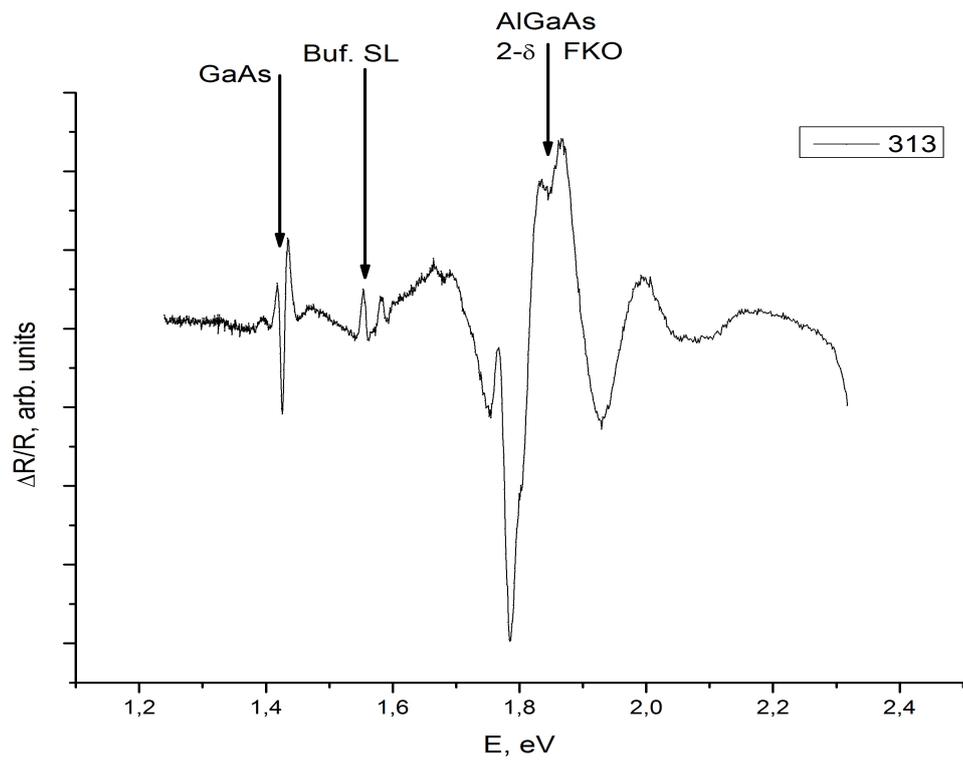


Рис. 9. Спектры образцов №313 и №719

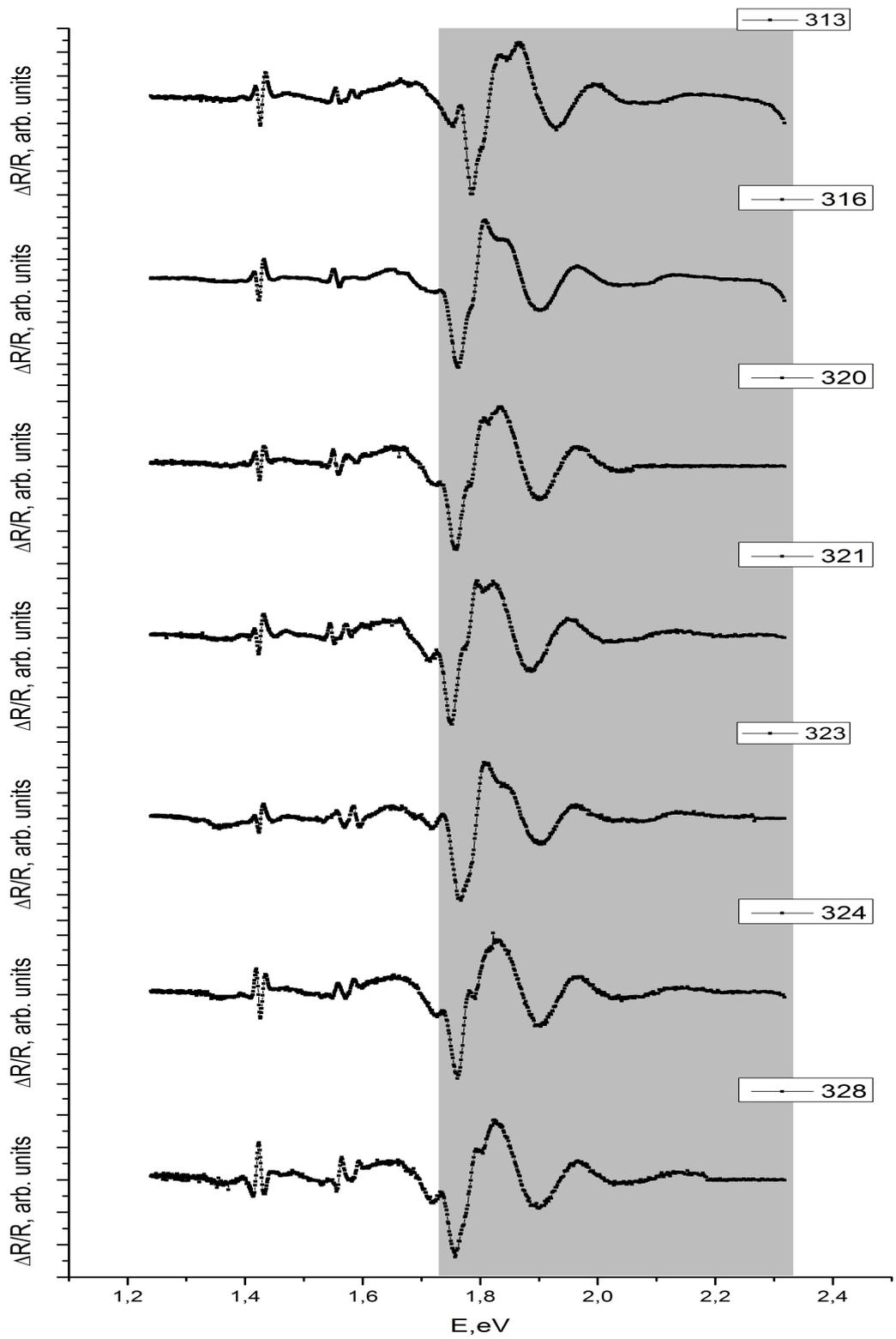


Рис. 10. Спектры полученные на выходе программы для образцов с 2 областями дельта-легирования

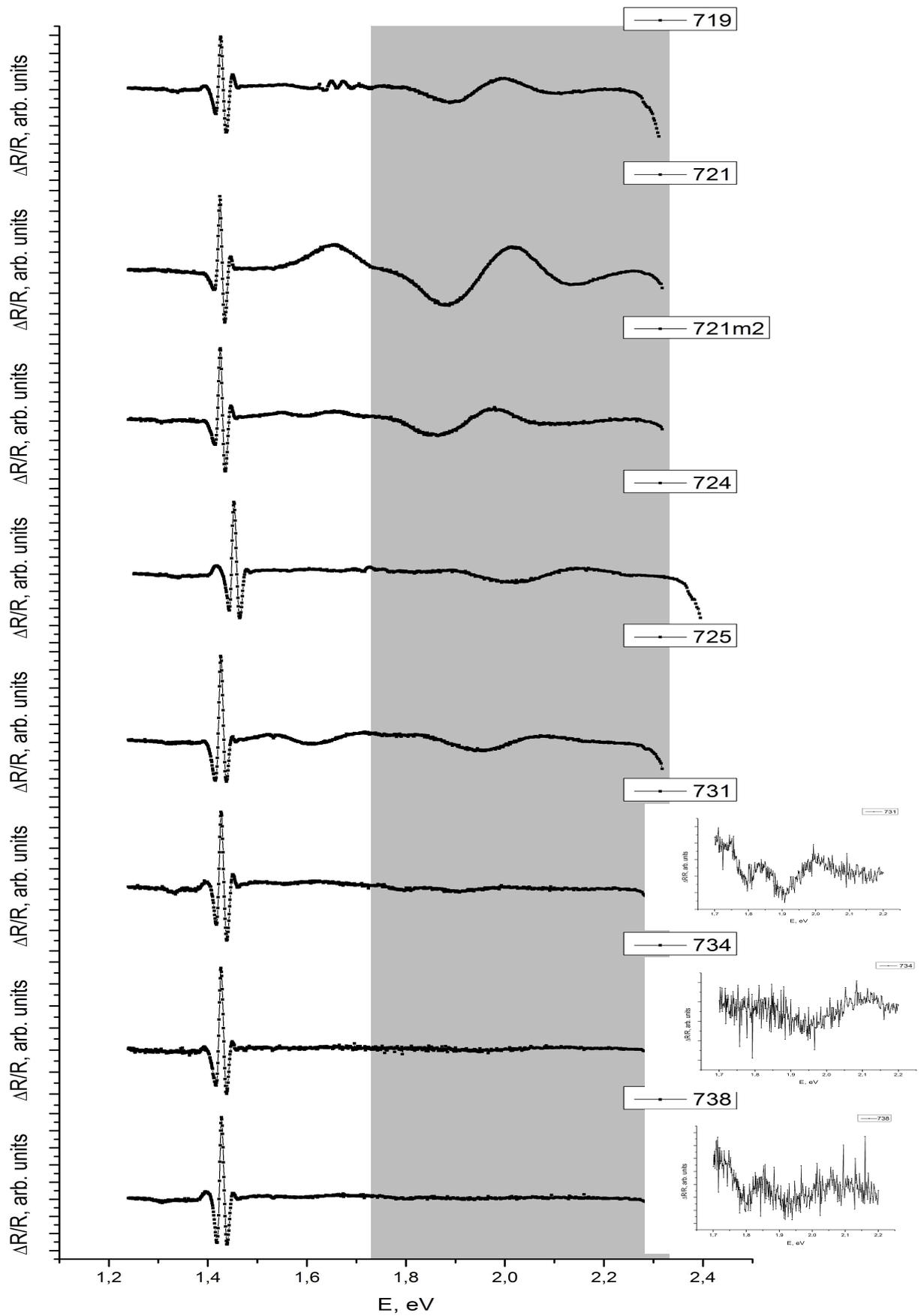


Рис. 11. Спектры полученные для образцов с 1 областью дельта-легирования

## Моделирование

Для большого числа периодов осцилляций Франца-Келдыша модель Альперовича верна, но в области дельта легирования у образцов наблюдается всего 1.5-3 периода колебаний. Для проверки модели в случае малого числа периодов было проведено моделирование.

Следовательно, была проведена обработка модуляционных спектров для модели Аспнеса и Штунды с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT). Всего было рассмотрено 4 варианта модуляции для 4 различных периодов (1T, 1.5T, 2T, 2.5T): синус и 2 синуса с постоянной амплитудой и экспоненциальным затуханием амплитуды.

На рис. 12 и рис. 13 изображены характерные зависимости БПФ для полученных модуляционных сигналов. На графиках можно видеть различие в количестве пиков после преобразования. Наличие 2х пиков у двух модулированных синусов говорит о наличии двух разных частот в осцилляциях, что дает основание доверять модели и полагать о существовании в образцах с 2 дельта-легированием встроенных электрических полей с разными напряженностями от тяжелых и легких дырок.

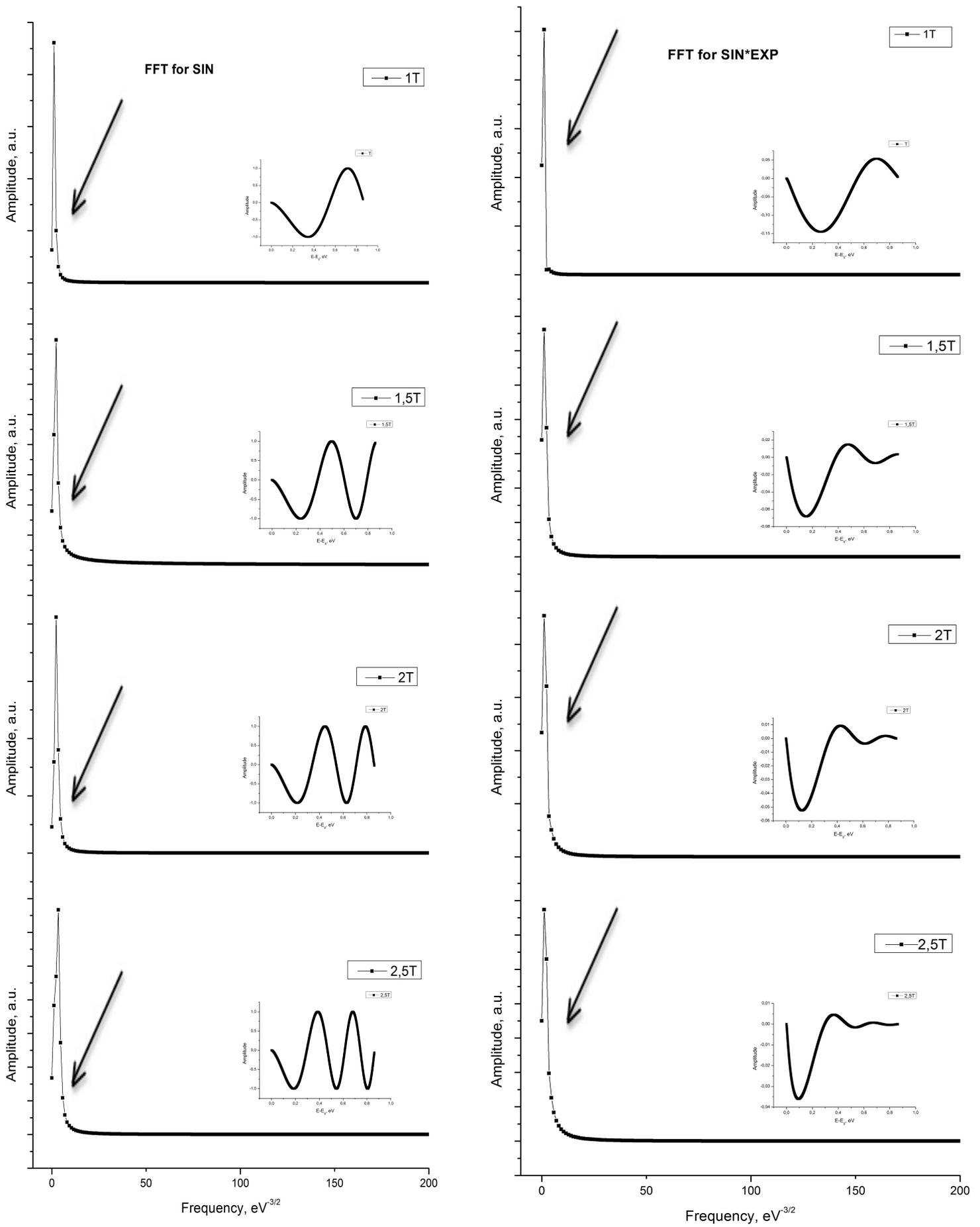


Рис. 12. БПФ для синуса и затухающего синуса

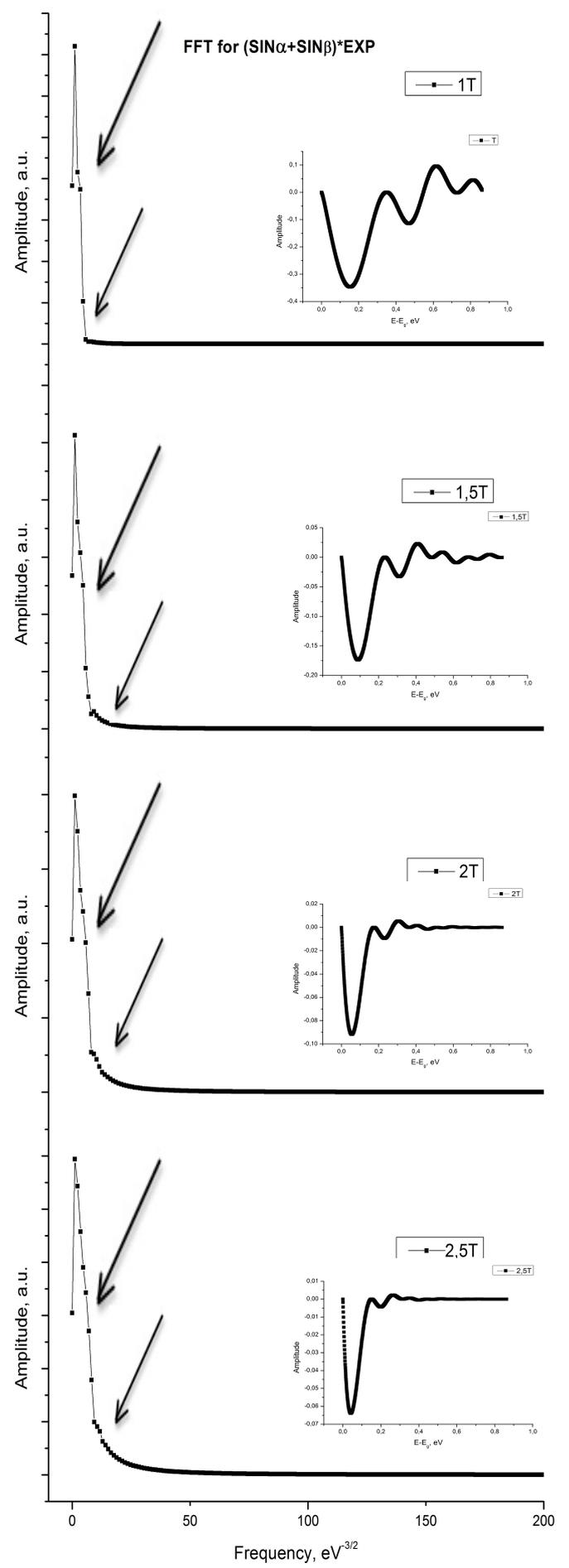
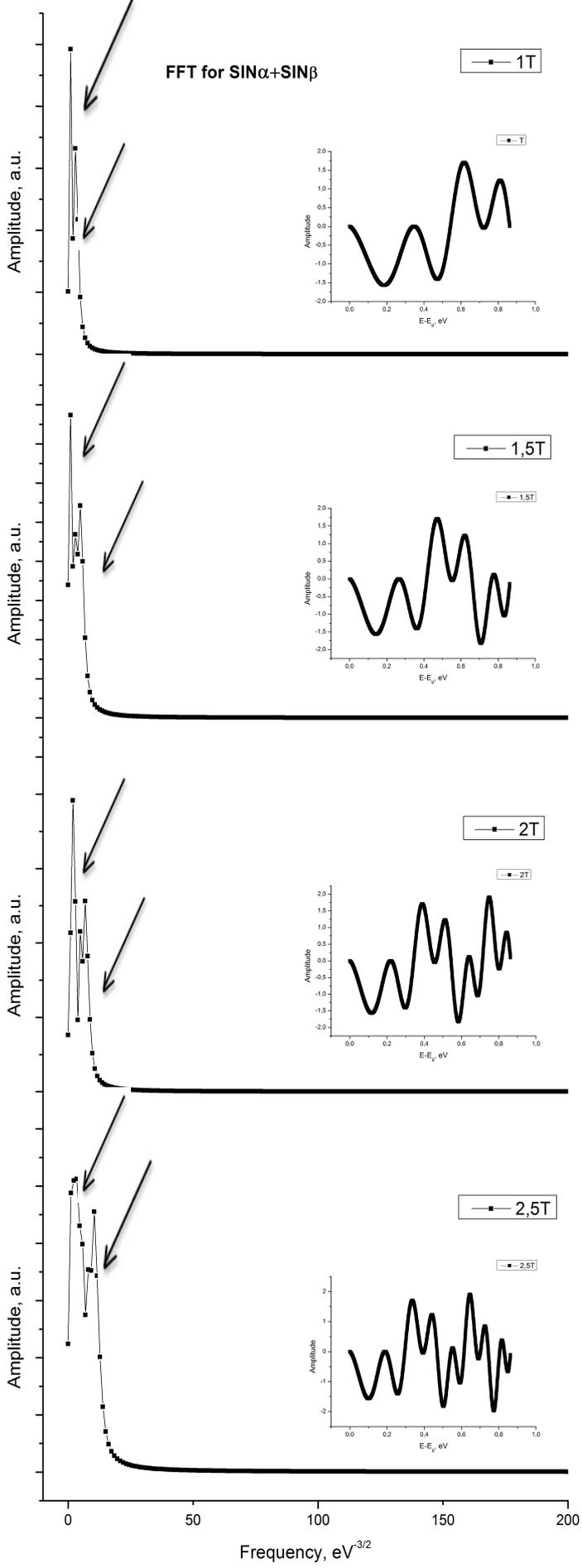


Рис. 13. БПФ для двух синусов и двух затухающих синусов

На рис. 14 видна зависимость квадрата модуля интенсивности от частоты. Данные рисунки были получены и проанализированы при помощи FFT (Fast Fourier Transform) и базового набора функций пакета программы OrifinPro 8.

С помощью Фурье-анализа спектра проведена обработка спектра ФО и получены значения напряженности встроенного электрического поля.

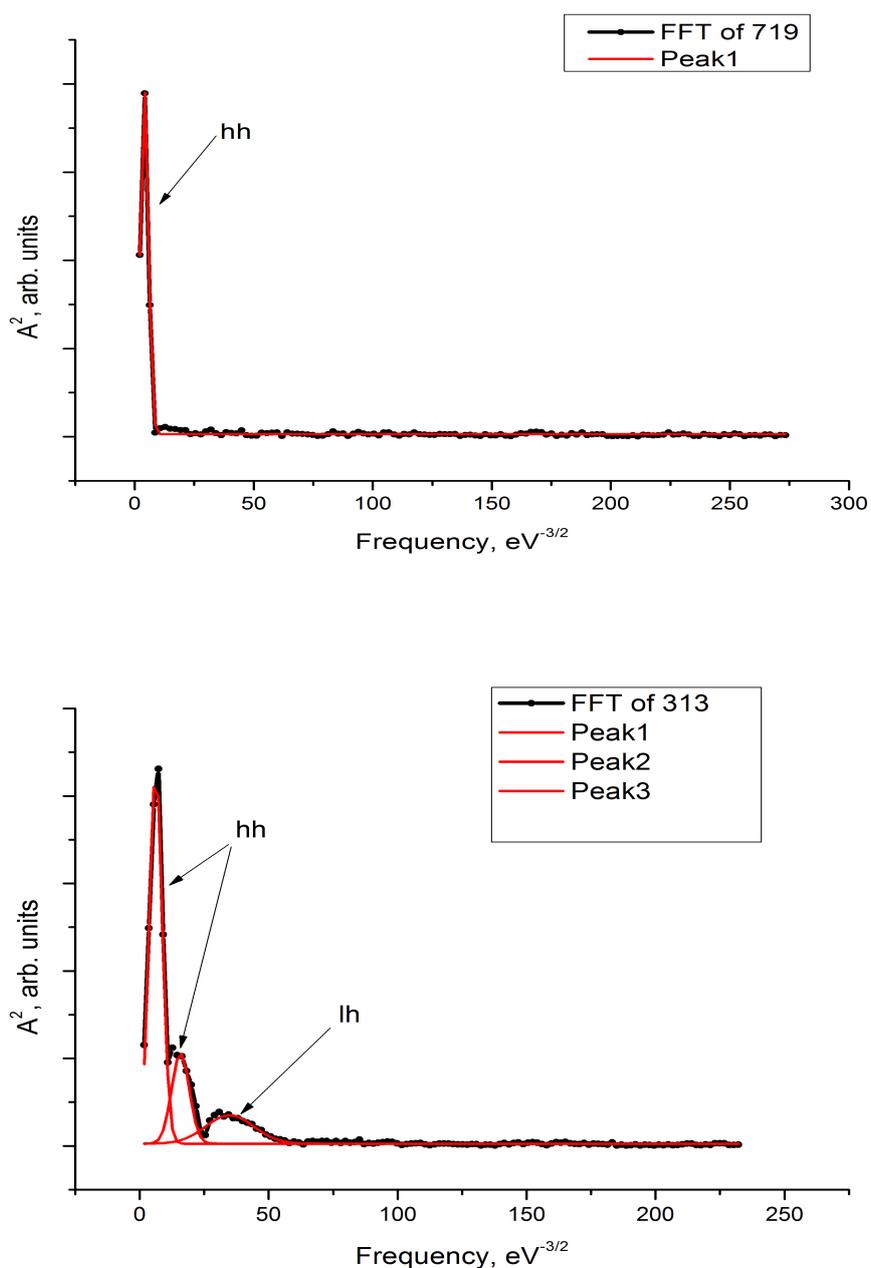


Рис. 14. Зависимость квадрата модуля интенсивности от частоты после FFT в OriginPro 8 для образцов №313 и №719

## Основные результаты и выводы

При комнатной температуре получены и исследованы спектры фотоотражения AlGaAs с областями дельта и 2-дельта легирования.

Сигнал от областей дельта легирования представляет собой осцилляции Франца-Келдыша, состоящие из 1,5-3 периодов.

В серии образцов 3xx в области энергий 1.3-1.5 эВ сигнал от подложки GaAs значительно меньше, по сравнению с серией 7xx, что связано с большим порядком кулоновского экранирования за счет большего числа носителей заряда в областях дельта легирования и области сверхрешетки у образцов с двумя дельта слоями (3xx).

В спектрах одной серии наблюдается раздвоение линий в спектральном диапазоне 1.8-1.9 эВ, а в образцах другой серии в указанном диапазоне наблюдается одиночная линия. Наблюдаемое раздвоение можно объяснить наложением осцилляций Франца-Келдыша от приповерхностной и подъемной областей легирования исследуемой структуры [18].

Возможность моделирования для гармонического и затухающего гармонического сигнала подтвердила предположение о применении быстрого преобразования Фурье с 1.5-3 периодами осцилляций Франца-Келдыша для спектров фотоотражения в модели Аспнеса и Штудны.

В результате обработки спектров фотоотражения с осцилляциями Франца-Келдыша с помощью быстрого преобразования Фурье получены зависимости модуля модуляционного сигнала от «частоты» осцилляций. Для определения модуля вектора напряженности электрического поля предложена методика соотнесения «частот» осцилляций [13]. Определены значения модуля вектора напряженности для тяжелых дырок от областей дельта легирования для серии образцов 3xx и 7xx [19,20]. Данные приведены в таблице 1.

<b>N</b>	<b>№ образца</b>	<b><math>E_{hh}, \frac{kV}{cm}</math></b>
1	313	$422 \pm 3$
2	316	$408 \pm 3$
3	320	$398 \pm 1$
4	321	$389 \pm 2$
5	323	$389 \pm 4$
6	324	$398 \pm 2$
7	328	$409 \pm 3$
8	719	$653 \pm 2$
9	721	$802 \pm 1$
10	721m2	$696 \pm 2$
11	724	$780 \pm 5$
12	725	$817 \pm 13$
13	731	$734 \pm 27$
14	734	$787 \pm 23$
15	738	$705 \pm 22$

*Табл.1. Модуль вектора напряженности для тяжелых дырок от областей дельта легирования*

## Литература

1. Мейер Дж., Эриксон Л., Дэвис Дж. «Ионное легирование полупроводников» изд. «Мир», Москва (1973)
2. Levine A., da Silva E. C. F, Sipahi G. M., Quivy A. A., Scolfaro L. M. R., Leite J. R., Dias I. F. L., Lauretto E., de Oliveira J. B. B., Meneses E. A., Oliveira A. G. «Band-edge modifications due to photogenerated carriers in single p-type  $\delta$ -doped GaAs layers», Phys. Rev. B 59, 4634 - 4637 (1999)
3. Walter Franz, Einfluß eines elektrischen Feldes auf eine optische Absorptionskante, Z. Naturforschung **13a** 484-489 (1958)
4. Misiewicz J., Sitarek P., Sek G., Kudrawiec R. «Semiconductor heterostructures and device structures investigated by photoreflectance spectroscopy» Mat. Scie. Vol. 21(3), p. 263 (2003)
5. Murtagh, M.E., Ward, S., Nee, D., Kelly, P.V. «Advances in modulation spectroscopy: State-of-art photoreflectance metrology» Applied Surface Science 253 (1 SPEC. ISS.), pp. 145-151(2006)
6. А. Н. Георгобиани, «Модуляционная спектроскопия полупроводников» СОЖ, 2001, № 6, с. 75–81.
7. Shen H., Dutta M. «Franz-Keldysh oscillations in modulation spectroscopy» J. Appl. Phys. Vol. 78(4), p. 2151 (1995)
8. Pollak F.H. «Non-destructive, room temperature, characterization of wafer-sized III-V semiconductor device structures using contactless electromodulation and surface photovoltage spectroscopy». SPIE proc. Vol. 3944 p. 408 (2000)
9. Келдыш Л.В. «О влиянии сильного электрического поля на оптические характеристики непроводящих кристаллов» ЖЭТФ том 34, №5, стр. 1138 (1958)
10. Tharmalingam K. «Optical absorption in the presence of an uniform field» Phys. Rev. Vol. 130, No 8, p. 2204 (1963)

11. Aspnes D.E. «Band nonparabolicities, broadening, and field distributions: The spectroscopy of Franz-Keldysh oscillations» Phys Rev B. Vol. 10, p. (1974)
12. Aspnes D.E. «Third-derivative modulation spectroscopy with low-field electroreflectance». Surf. Science. Vol. 37, p. 418 (1973)
13. Sheibler H.E., Alperovich V.L., Jaroshevich A.S., and Terekhov A.S. «Fourier Resolution of Surface and Interface Contributions to Photoreflectance Spectra of Multilayered Structures». Phys. Stat. sol. (a) 152, 113 (1995)
14. Wang D.P. and Chen C.T. «Fast Fourier Transform of photoreflectance spectroscopy of  $\delta$ -doped GaAs». Appl. Phys. Lett. 67 (14), 2 October 1995
15. B. Čechavičius and J. Kavaliauskas, G. Krivaitė, D. Seliuta, and G. Valušis, M. P. Halsall, M. J. Steer, P. Harrison «Photoreflectance and surface photovoltage spectroscopy of beryllium-doped GaAs/AlAs multiple quantum wells». JOURNAL OF APPLIED PHYSICS **98**, 023508 2005
16. Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, А.В. Червяков «Автоматизированная установка для регистрации спектров фотоотражения с использованием двойного монохроматора». ЖТФ том 75, вып. 10, стр. 66-68 (2005)
17. Л.П. Авакянц, П.Ю. Боков, Н.А. Волчков, И.П. Казаков, А.В. Червяков «Определение концентрации носителей в легированных слоях n-GaAs методами спектроскопии комбинационного рассеяния света и фотоотражения». Оптика и спектроскопия, том 102, №5, стр. 789-793, 2007
18. П.Ю. Боков, Е.А. Труфанов, И.И. Лялин «Спектры фотоотражения 1-дельта и 2-дельта легированных структур на основе AlGaAs/InGaAs», Тезисы, доклады XIV Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, г. Санкт-Петербург, 2012 г., стр.54
19. П.Ю. Боков, Е.А. Труфанов «Фурье-анализ спектров фотоотражения легированных пленок GaAs», доклады XIX Международная

конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов»,  
г. Москва, 2012 г.

20. L.P. Avakyants, P.Yu. Bokov, A.V. Chervyakov, I.P. Kazakov, E.A. Trufanov «Fast Fourier Transform of the Frantz-Keldysh oscillations from the InGaAs/GaAs/AlGaAs structures with the nonuniform built-in electric field», XXI International Conference on Spectral Line Shapes, June 2012, St Petersburg, p.42

## Описание программы

Для обработки экспериментально полученных спектров на языке C++ была написана программа “program.exe” с целью разбиения спектра на 1024 точки. Также с помощью данной программы был произведен перевод единиц шкалы из Ангстрем в эВ и произведена линейаризация значений интенсивности для полученных точек для энергии методом трапеции.

Цель написания программы заключалась в том, что для корректного применения FFT (Fast Fourier Transform) спектра в пакете OriginPro 8 необходим линейаризованный спектр с количеством точек  $2^N$  (N-целое число).

Программа является приложением Win32 Console Application. Работа ведется с файлом “file.spс” (должен находиться в той же папке, что и сама программа), в котором содержатся значения интенсивностей исходного спектра. После завершения работы программы в папке с программой появляется конечный файл “out\_file.txt”.

