

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский физико-технический институт (государственный университет)"

Выпускная квалификационная работа на степень бакалавра

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДВУМЕРНЫМИ
ЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ.**

Студент–дипломник _____ Фёдоров И.Б.

Научный руководитель

д.ф.-м.н _____ Дорожкин С.И.

Зав. кафедрой

чл.-корр. РАН _____ Кведер В.В.

Черноголовка 2016

Contents

I. Введение.	3
II. Строение образца.	6
III. Схемы экспериментов.	7
1. Селективный усилитель с синхронным детектированием(лок-ин)	8
2. Схема измерения фотоэдс.	10
3. Схема измерения ёмкости.	11
4. Схема измерения фототока.	12
IV. Описание результатов эксперимента.	12
5. Сравнение фототоков, фотоэдс и магнетосопротивления, измеренных в одинаковых условиях.	13
6. Фототок между затвором и различными внутренними(или внешними) контактами.	15
7. Фототок при различных затворных напряжениях.	17
8. Сравнение фотоэдс, измеренной прямым методом и вычисленной из фототока.	17
V. Обсуждение результатов эксперимента.	20
VI. Заключение.	21
Список литературы	22

I. Введение.

В последнее десятилетие развиваются исследования эффектов, проявляющихся под воздействием микроволнового излучения на двумерные электронные системы (далее ДЭС), образующиеся в гетеропереходах. Важным событием в этой области науки явилось открытие магнетоосцилляций сопротивления, индуцированных микроволновым излучением (в англоязычной литературе *microwave induced resistance oscillations, MIRO*) (см. обзор [1]). Период этих осцилляций определяется соизмеримостью энергии микроволнового фотона и циклотронного расщепления, а осциллирующая добавка к диссипативной проводимости приближенно описывается формулой:

$$\Delta\sigma(H) = -\frac{\omega}{\omega_c} A_\omega \sin(2\pi \frac{\omega}{\omega_c}) \exp(-\alpha \frac{\omega}{\omega_c}), \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ - круговая частота падающего микроволнового излучения, m - эффективная масса электрона в ДЭС, $\omega_c = \frac{|e|H}{m}$ - циклотронная частота, A_ω - коэффициент, зависящий от круговой частоты микроволнового излучения ω , α - коэффициент затухания осцилляций. Максимумы фотопроводимости наблюдаются при отношении $\frac{\omega}{\omega_c}$ равном $n - \frac{1}{4}$, где n - целое число. Ещё одной областью исследований, которой и посвящена данная дипломная работа, является измерение фототоков и фотоэдс, возникающих под воздействием излучения в образцах с ДЭС. [2, 4] Фотогальванические сигналы демонстрируют магнето-осцилляции той же периодичности, что и MIRO, однако, в отличие от последних, осциллируют относительно нулевых значений. Объяснение существования этих сигналов состоит в наличии в образце встроенного электрического поля, основной вклад в которое, по-видимому, вносит загиб зон около легированных контактов, используемых при измерении фото-сигналов, а также нарушение соотношения Эйнштейна между проводимостью и коэффициентом диффузии электронов в неравновесном состоянии под облучением [2, 4]. А именно, в отличие от проводимости коэффициент диффузии электронов практически не зависит от облучения. (см. рис. 1 в [3])

Если в предыдущих исследованиях измерения фото-гальванических сигналов осуществлялись между двумя легированными контактами, задачей этой дипломной работы являлось проведение измерений в схеме с одним легированным контактом. Для такого исследования был использован образец на основе гетероструктуры GaAs/AlGaAs с

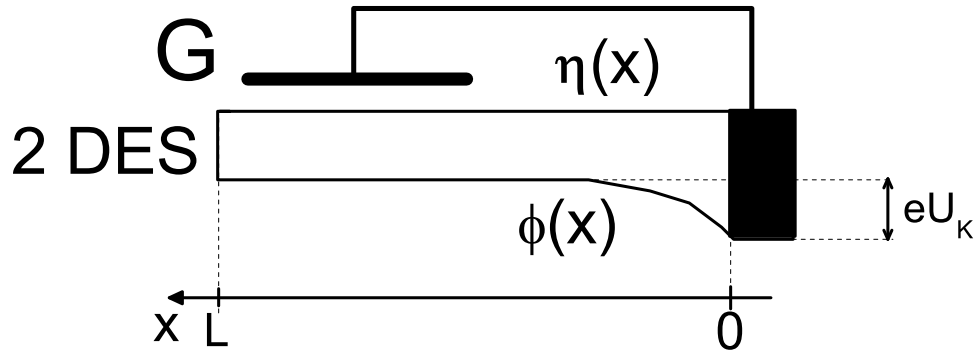


Рис. 1: Упрощённая схема методики эксперимента. $\eta(x)$ обозначает электрохимический потенциал, $\phi(x)$ - электрический потенциал в ДЭС. В равновесии электрохимический потенциал постоянен по всему образцу. G обозначает затвор, чёрный прямоугольник - омический контакт, граница которого с ДЭС имеет нулевую координату. В отсутствие затворного напряжения электрохимические потенциалы затвора и контакта равны. Схематически это обозначено соединением проводником. В отдельных экспериментах между затвором и контактом дополнительно прикладывалось затворное напряжение, изменявшее загиб зон в ДЭС около границы затвора.

омическими контактами (внутренними, т.е. окруженными ДЭС со всех сторон, и внешними, т.е. латерально расположенными на границе ДЭС) и металлическим затвором. Такая схема дает дополнительную возможность изменения встроенного в ДЭС электрического поля около затвора путем приложения к нему электрического напряжения. Схематически методика проиллюстрирована на рисунке 1. Физическая суть методики состоит в следующем:

В отсутствие облучения образец находится в равновесии и вследствие наличия разности работ выхода между контактом и ДЭС между ними устанавливается разность электрических потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = U_c = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{e}$, Φ_1 - работа выхода контакта, Φ_2 - работа выхода ДЭС, e - заряд электрона (см. рис. 1). В равновесии условием отсутствия тока является постоянство электрохимического потенциала в образце.

Присоединение контакта к затвору приводит к появлению разности потенциалов U_c между затвором и ДЭС под ним. Как будет показано ниже, облучение приводит к изменению потенциала контакта на величину фото-ЭДС U_{photo} и, тем самым, на такую же величину меняется разность потенциалов U_c . В результате заряд ДЭС под затвором ме-

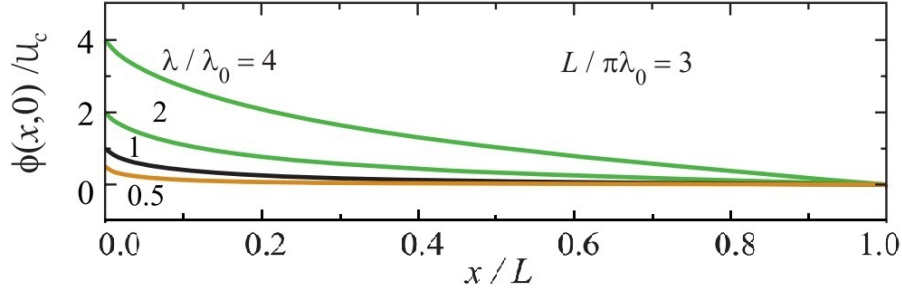


Рис. 2: Расчёт зависимости электрического потенциала $\phi(x)$ от координаты при различных проводимостях ДЭС и одинаковом коэффициенте диффузии. $\frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0}$, σ_0 - проводимость ДЭС без облучения, σ - проводимость ДЭС под облучением, eU_c - разность работ выхода между ДЭС и левой металлической пластиной(плоскость $x = 0$).

няется аналогично плоскому конденсатору. Модуляция мощности излучения приводит к протеканию переменного тока между ДЭС и затвором.

Изменение потенциала на контакте при изменении проводимости ДЭС демонстрируется на рис.2 результатами расчета, выполненного в работе [3].

В статье [3] был проведён расчёт зависимости(см. рисунок 2) электрического потенциала $\phi(x)$ ДЭС от координаты при различных проводимостях ДЭС и одинаковом коэффициенте диффузии в следующей геометрии: в плоскости $x = 0$ располагалась бесконечная металлическая пластина, которая моделировала легированный контакт, область $z = 0, L > x > 0$ занимала ДЭС с проводимостью σ , плоскость $x = L$ занимала вторая металлическая пластина, чья работа выхода равнялась работе выхода ДЭС и чей электрический потенциал $\phi(L)$ принимался равным нулю, $\lambda = \varepsilon D / 2\pi\sigma$. Вдоль оси y образец предполагался бесконечным. В итоге решение задачи(электрический потенциал ДЭС) $\phi(x)$ зависело от одной координаты x .

В зависимости от проводимости ДЭС σ электрический потенциал левого контакта($x = 0$ на рисунке 2) принимает различные фиксированные значения. Разность электрических потенциалов левого контакта под облучением(различные значения $\lambda/\lambda_0 \neq 1$) и без облучения $\lambda/\lambda_0 = 1$ и есть величина фото-ЭДС.

Величина фото-ЭДС между контактом и ДЭС, возникающей за счёт изменения загиба зон около левого контакта, зависит от проводимости ДЭС σ и разницы работ выхода

eU_c между контактом и ДЭС как(см. работу [3])

$$U_{photo} = U_c \left(\frac{D}{D_0} \frac{\sigma_0}{\sigma} - 1 \right) \quad (2)$$

где D и σ - коэффициенты диффузии и проводимости ДЭС под облучением, D_0 и σ_0 - в отсутствие облучения. Под облучением коэффициент диффузии меняется слабо(см., например, работу [3]), поэтому считаем, что $D = D_0$ и получаем в итоге:

$$U_{photo} = U_c \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} - 1 \right) \quad (3)$$

В такой трактовке фотоэдс между двумя контактами есть разность изменений их электрических потенциалов под облучением и , следовательно, есть разность фото-ЭДС, возникающих между каждым из контактов и ДЭС.

При изменении магнитного поля вслед за проводимостью σ осциллирует фотоэдс U_{photo} . Отметим, что величина и фаза этих осцилляций определяется значением U_c , определяющим величину и знак загиба зон.

Отработка методики измерения фотогальванических сигналов между затвором и омическим контактом к ДЭС, а также определение знака загиба зон около контактов составляют основное содержание данной дипломной работы.

II. Строение образца.

Образец представляет из себя мезу в виде холловского мостика на основе гетероструктуры GaAs / AlGaAs с квантовой ямой, которая была получена методом молекулярно-лучевой эпитаксии(см. [5]), и систему контактов. Также на поверхность гетероструктуры напылены две непересекающиеся металлические плёнки, которые используются в качестве затворов. Отметим, что плёнки покрывают лишь часть мезы.

Рассмотрим поперечное строение образца(см. рисунок 3). На расстоянии 160 нм от поверхности гетероструктуры находится квантовая яма шириной 29нм. Слои легирования из кремния находятся по обе стороны от квантовой ямы на одинаковом расстоянии 82 нм. В структуре два слоя легирования для того, чтобы увеличить концентрацию носителей в ДЭС при фиксированной величине спейсера(см. обзор [5])Концентрация

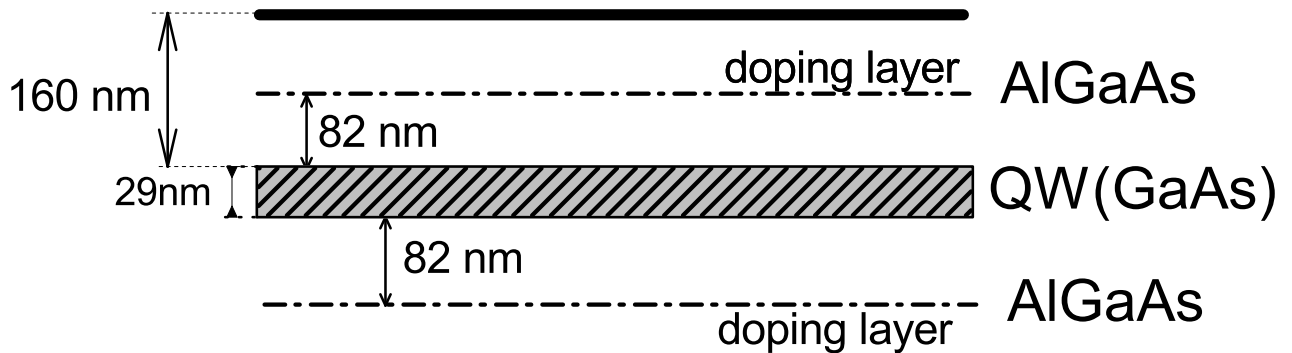


Рис. 3: Поперечное строение образца. Жирной линией обозначена поверхность гетероструктуры, заштрихованный слой обозначает квантовую яму, штрих-пунктирная линия обозначает слой легирования.

электронов в ДЭС вдали от затвора - $2.7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, подвижность при $T = 4.2 \text{ К}$ составляет $15 \cdot 10^6 \text{ см}^2/(\text{В с})$.

Рассмотрим строение мезы (см. рисунок 4). Меза состоит из двух частей, каждая из которых вытравлена в форме холловского мостика. Два токовых контакта (обозначены цифрой 6 на рисунке 4) разных мез соединены провололочкой. Внутри мезы вжигались омические контакты, которые обозначены на рисунке 4 блестящими прямоугольниками. Внутренние контакты имеют номера 14, 13, 19, 1; внешние контакты - 16, 9, 18, 7, 8; контакты, использованные для задания тока - 6, 15, 11. Часть правого холловского мостика покрыта двумя затворами (на рис. 4 обозначены G2 и G3). Для измерения, как правило, использовался затвор G3. Характерные размеры: ширина левой мезы - 400 мкм, правой - 800 мкм, расстояние между ближайшими внешними контактами с одной стороны верхней половины холловского мостика - 350 мкм, ширина затвора - 500 мкм.

III. Схемы экспериментов.

В данной дипломной работе проводились три основных эксперимента: измерение фотоэдс между двумя контактами, измерение ёмкости между ДЭС и металлическим затвором и измерение фототока между одним из контактов к ДЭС и металлическим затвором. Ниже будут представлены схемы измерения этих величин.

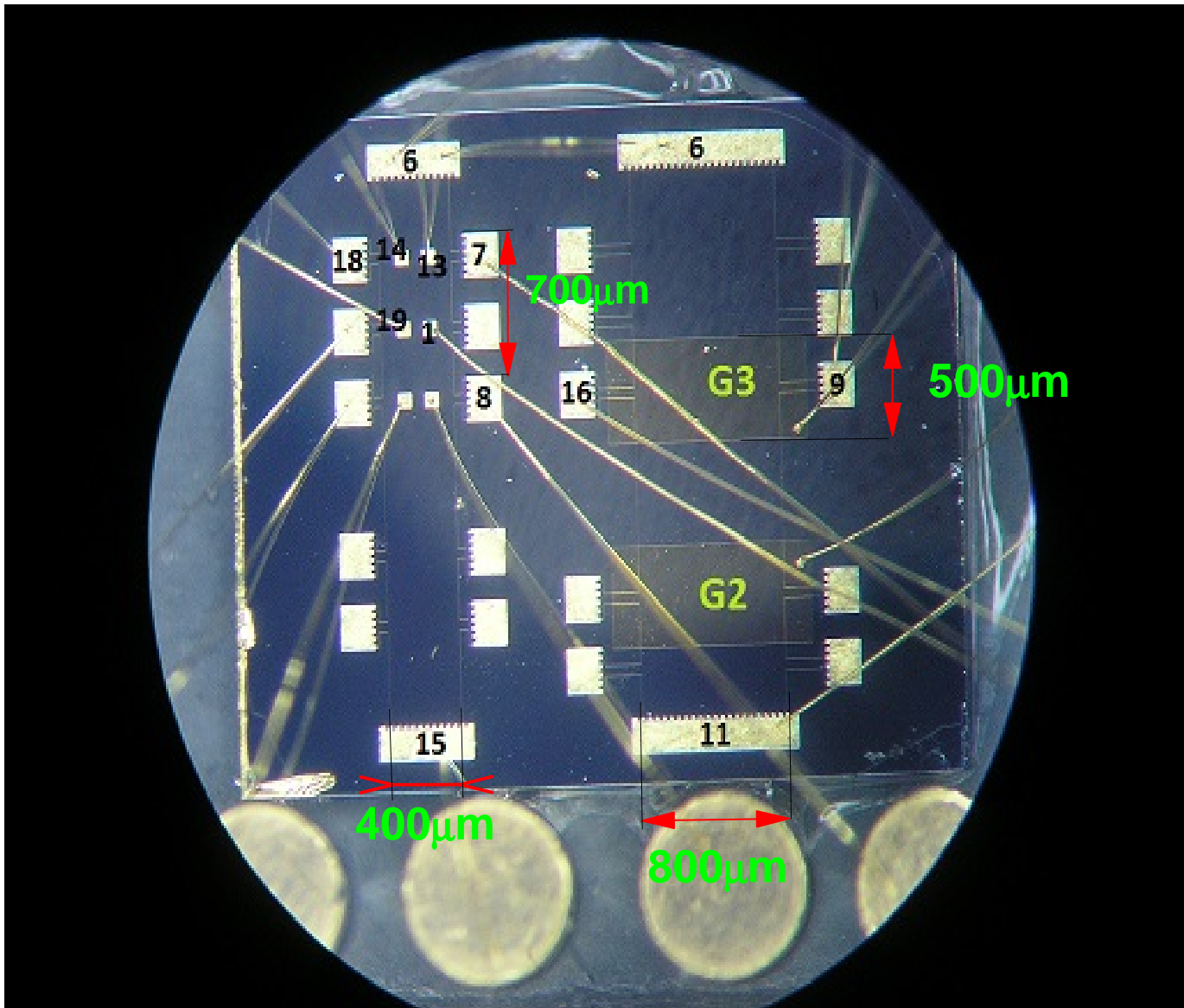


Рис. 4: Образец, вид сверху. Образец расположен на подложке, имеющей на рисунке синий цвет. Блестящие прямоугольники - внутренние и внешние контакты, G2 и G3 - затворы, бледно-жёлтый контур обозначает границу мезы. Пояснения к размерам смотри в тексте.

1. *Селективный усилитель с синхронным детектированием(лок-ин)*

Во всех трёх типах измерений используется селективный усилитель с синхронным детектированием(далее лок-ин). Локин - устройство для регистрации слабого сигнала от исследуемой системы на фоне шумов и помех.

Принцип работы цифрового лок-ина в режиме модуляции от внешнего генерато-

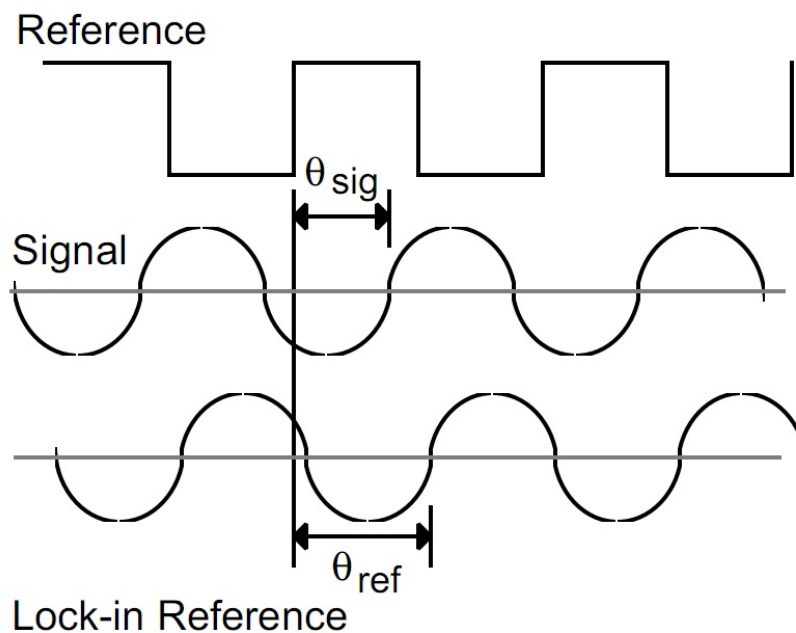


Рис. 5: Иллюстрация к измерению сигнала с помощью лок-ина. Подпись "Reference" указывает на прямоугольный опорный сигнал, "Signal" есть измеряемый внешний сигнал, "Lock-in reference" есть синусоидальный сигнал, генерируемый лок-ином с помощью опорного сигнала. $\theta_{sig}(\theta_{ref})$ - разность фаз между опорным и измеряемым сигналом (синусоидальным сигналом лок-ина).

ра заключается в следующем: на вход опорного сигнала лок-ина ("REF IN") подаётся внешний прямоугольный сигнал с периодичностью, определяемой частотой, чью составляющую в измеряемом сигнале мы хотим узнать. Лок-ин, используя прямоугольный опорный сигнал, а также фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ), генерирует синусоидальный сигнал с частотой, задаваемой опорным сигналом. Этот сигнал имеет фиксированную разность фаз со входным сигналом (см. рисунок 5). Эта разность фаз также регулируется пользователем. Затем сгенерированный синусоидальный сигнал перемножается со входным сигналом.

В итоге перемноженный сигнал разделяется на две составляющие: низкочастотная и высокочастотная. Фильтром низких частот высокочастотная компонента отсекается. Низкочастотная же компонента измеряется прибором. Лок-ин меряет две компоненты входного сигнала, повернутые на 90 градусов друг относительно друга. Подстройкой

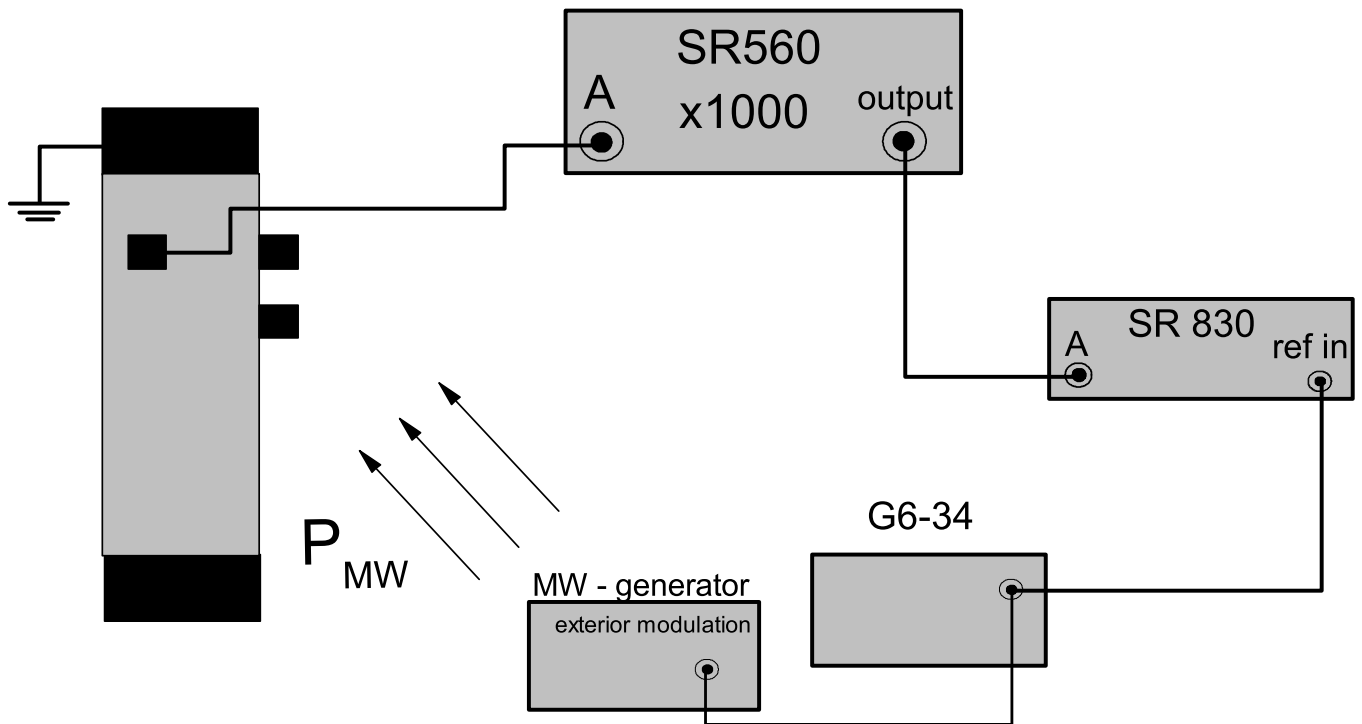


Рис. 6: Схема измерения фотоэдс. Серые прямоугольники обозначают соответствующие приборы, чёрные прямоугольники - контакты на образце. Стрелки обозначают микроволновое излучение мощности P_{MW} .

фазы можно добиться того, что одна компонента будет находиться в фазе с опорным сигналом, а другая будет повернута на 90 градусов относительно него.

2. Схема измерения фотоэдс.

Опишем схему измерения фотоэдс между двумя контактами (рис 6). На образец подаётся микроволновое излучение модулированной мощности P_{MW} . Источником излучения в диапазоне 53.57 - 78.33 ГГц являлся генератор Г4-142, в диапазоне 78.33-118.1 ГГц - генератор РГ4-14. Внешняя модуляция мощности излучения прямоугольными импульсами на частоте 1кГц обеспечивается генератором сигналов Г6-34. Один из контактов заземлён (на рис. 6 - это внешний контакт сверху), другой подключен на вход А предусилителя сигналов SR 560 (на рис. 6 - это внутренний контакт). После усиления сигнал подаётся на вход А лок-ина SR 830. В качестве опорного сигнала для лок-ина

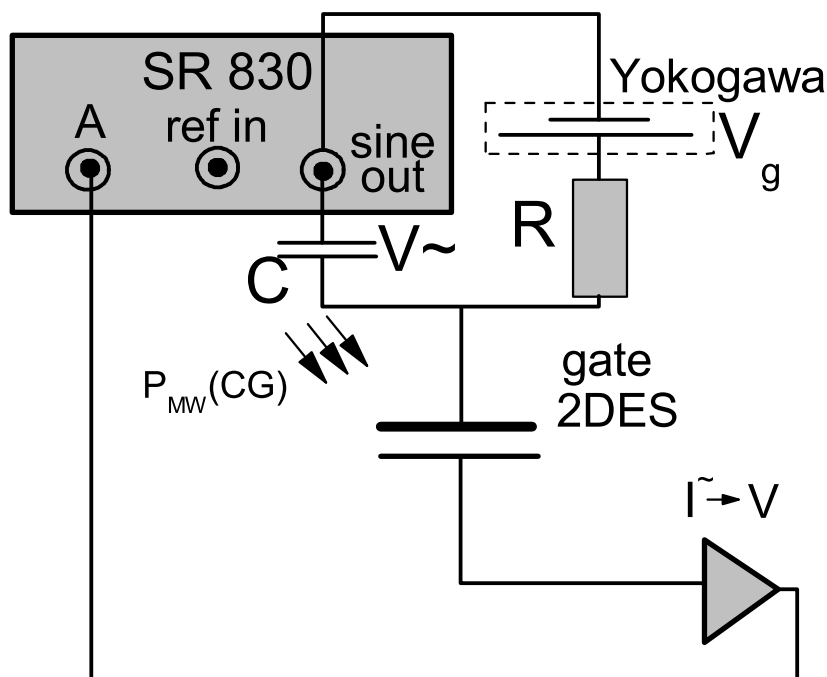


Рис. 7: Схема измерения ёмкости. *gate* обозначает затвор, *DES* - двумерную электронную систему, Yokogawa - источник постоянного напряжения V_g , CG (=continuous generation) обозначает микроволновое излучение постоянной мощности, внешний ободок выхода "sine out" локина SR 830 является измерительной землёй.

используется сигнал модуляции с генератора Г6-34. Основную информацию о сигнале будет нести реальная компонента входного сигнала, находящаяся в фазе с сигналом модуляции.

3. Схема измерения ёмкости.

Опишем схему измерения ёмкости(рис. 7). На ДЭС, в зависимости от эксперимента, либо подаётся постоянное микроволновое излучение, либо мощность подаваемого излучения равна нулю. На затвор подаётся переменное напряжение от лок-ина амплитуды $V \sim$ и круговой частоты ω через ёмкость $C = 100nF$ и постоянное напряжение V_g от генератора Yokogawa через сопротивление $R = 10M\Omega$. Один из омических контактов к ДЭС подключён к конвертору ток-напряжение. После преобразования сигнал подаётся на вход А лок-ина. Опорный сигнал, генерируемый лок-ином самостоятельно, исполь-

зается для подачи переменного напряжения на затвор. Информацию о ёмкости будет нести компонента входного сигнала лок-ина, повёрнутая на 90 градусов относительно опорного сигнала.

Ёмкость пересчитывается из входного сигнала лок-ина по формуле

$$C = \frac{U_Y K}{V \omega}, \quad (4)$$

где C - ёмкость между ДЭС и затвором, U_Y - компонента входного сигнала лок-ина, повёрнутая на 90 градусов относительно опорного сигнала, K - коэффициент преобразования тока в напряжение, $V \sim$ и ω - соответственно амплитуда и круговая частота переменного сигнала, подаваемого на затвор.

4. *Схема измерения фототока.*

Опишем схему измерения фототока (рис. 8).

На образец подаётся микроволновое излучение модулированной мощности P_{MW} . Источник сигнала модуляции - генератор Г6-34. Один из омических контактов к ДЭС заземлён. Затвор подключается к конвертору ток-напряжение, в состав которого входит операционный усилитель (ОУ) с инвертирующим включением. После преобразования сигнал идёт на вход А лок-ина SR830. Опорным сигналом для лок-ина является сигнал генератора Г6-34. Так как основной импеданс в цепи определяется ёмкостью между затвором и ДЭС, информацию о фототоке будет нести компонента входного сигнала лок-ина, повёрнутая на 90 градусов относительно сигнала модуляции мощности. Также имеется возможность подавать на затвор постоянное напряжение V_g , равное напряжению на неинвертирующем входе ОУ, входящего во входной усилительный каскад конвертора.

IV. **Описание результатов эксперимента.**

Ниже будут представлены результаты эксперимента.

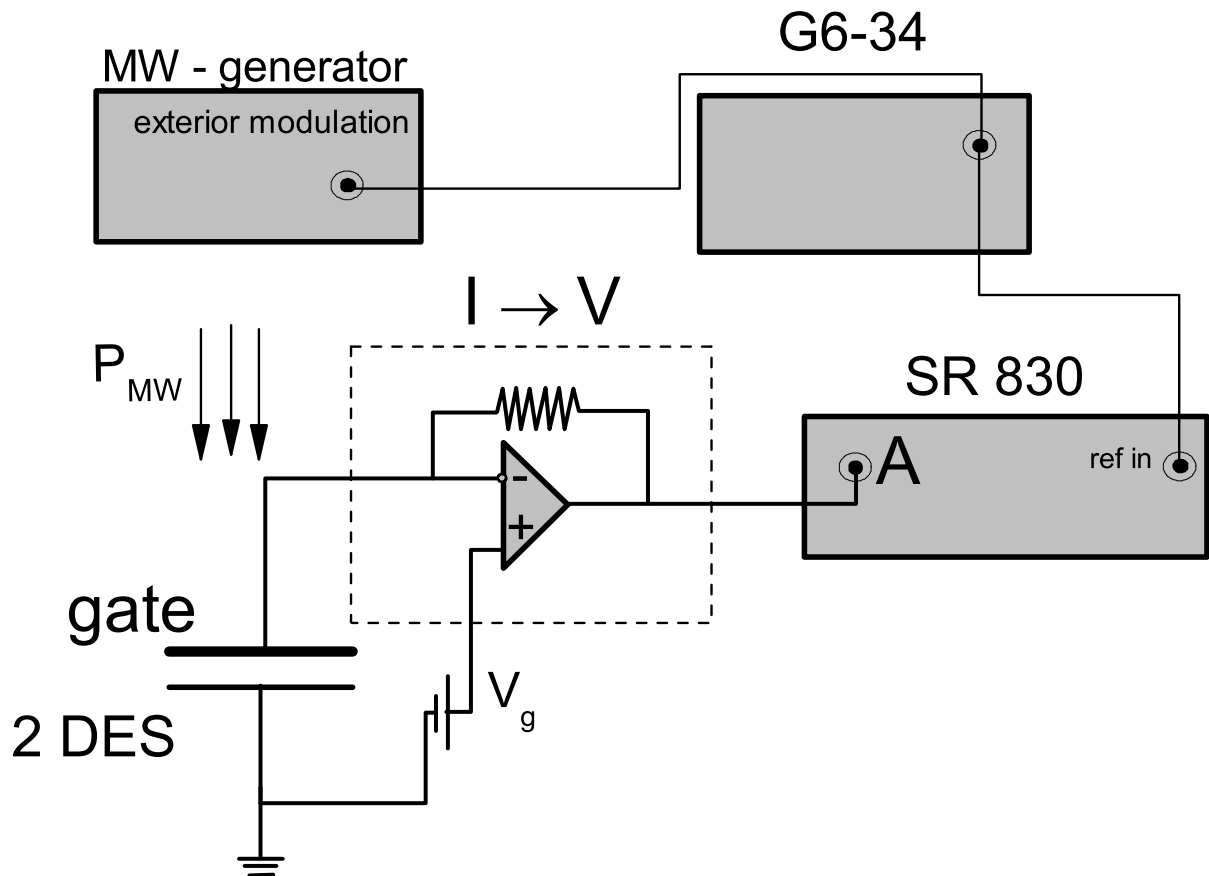


Рис. 8: Схема измерения фототока. Операционный усилитель с инвертирующим включением является составной частью конвертора ток-напряжение $I \rightarrow V$. Заземление ДЭС схематически обозначает заземление омического контакта к ДЭС.

5. Сравнение фототоков, фотоздс и магнетосопротивления, измеренных в одинаковых условиях.

На рис.9 приведены результаты измерений переменных фото-тока (панель А) и фото-ЭДС (панель В) в функции магнитного поля, а также магнетосопротивление (панель С) в присутствии и отсутствии постоянного облучения частоты 98 ГГц. Измерительные цепи схематически показаны на рисунках. Все приведенные сигналы осциллируют в функции поля, причем в основном синхронным образом. Идентифицировать эти осцилляции проще всего из сравнения кривых магнетосопротивления на панели С. В отсутствие излучения осцилляции магнетосопротивления, наблюдаемые при $H > 0.15$ Т,

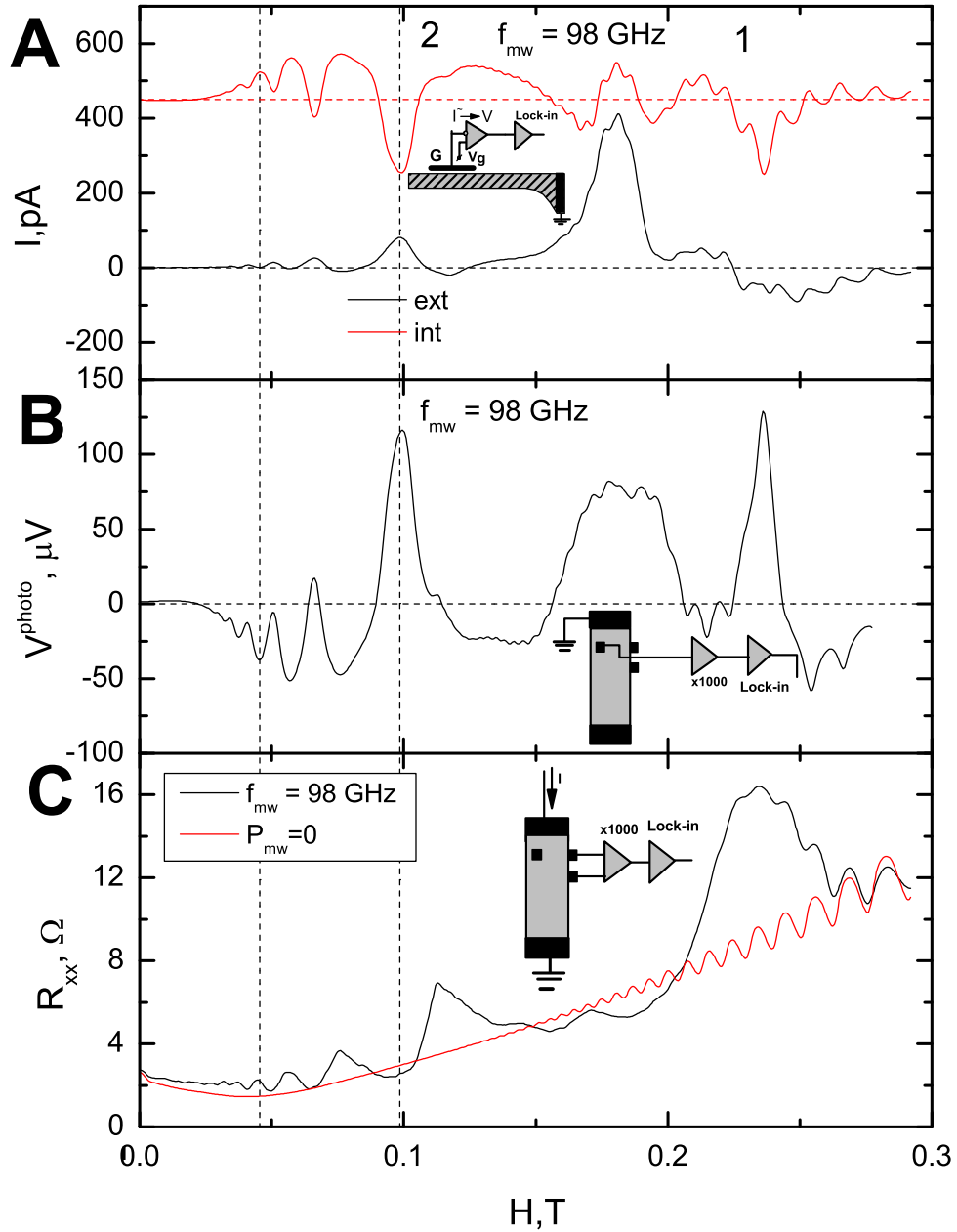


Рис. 9: Зависимости фототока(панель A), фотоэдс(панель B) и магнетосопротивления(панель C) от магнитного поля. Частота микроволнового излучения - $F_{MW} = 98.00 \text{ GHz}$. Вертикальная пунктирная линия с индексом 1(2) обозначает поле, соответствующее циклотронному резонансу(второй гармонике циклотронного резонанса), при $F_{MW} = 98.00 \text{ GHz}$, $H_c = 0.2348 \text{ T}$ ($\frac{H_c}{2} = 0.1174 \text{ T}$), вычисленному для электронов с эффективной массой в GaAs ($m^* = 0.067 m_e$). На каждой панели есть вставка, где изображена схема соответствующих измерений. Горизонтальные пунктирные линии обозначают нули соответствующих сигналов. Подробности смотри в основном тексте.

являются осцилляциями Шубникова - де Гааза. Под облучением возникают осцилляции значительно большей амплитуды, наблюдаемые в полях вплоть до 0.02 Т (MRO). Сравнение осцилляций фото-сигналов на панелях А и В при $H < 0.15$ Т показывает, что их экстремумы совпадают с экстремумами MRO, однако тип экстремума может быть противоположным. Так минимуму MRO при $H \approx 0.1$ Т соответствуют максимумы фото-ЭДС (панель В) и фототока на нижней кривой панели А и минимум на верхней кривой этой панели. Это наблюдение противофазы для осцилляций фототока, измеренных с использованием контактов различного типа (внутренних и внешних) составляет основную новизну полученных в дипломной работе результатов.

б. Фототок между затвором и различными внутренними(или внешними) контактами.

На панели А рисунка 10 изображены зависимости фототоков между затвором и различными внешними контактами. Красная кривая соответствует 15-ому контакту, розовая - 11-ому, зелёная - 16- ому. Нумерацию контактов смотри на рисунке 4. Красная, розовая и зелёная горизонтальные пунктирные линии обозначают нули соответствующих фототоков(кривые для 15-ого и 11-ого контактов сдвинуты вверх).

Важный вывод, который можно сделать на основании этого рисунка, заключается в том, что осцилляции всех трёх зависимостей находятся в фазе и ,более того, все три кривые имеют схожий вид.Отсюда следует, что фотосигналы, измеренные с использованием любого из внешних контактов, ведут себя одинаково.

В малых полях ($H < \frac{H_c}{2} = 0.1174T$) наблюдаются осцилляции с периодом MRO. В нулевом поле сигнал фототока зануляется.

На рисунке 10 в панели В изображены зависимости фототоков между затвором и различными внутренними контактами. Чёрная кривая соответствует 14-ому контакту, голубая - 13-ому, синяя - 1-ому. Чёрная, голубая и синяя пунктирные линии обозначают нули соответствующих фототоков.

Все три кривые также имеют сходный вид и осциллируют в фазе.

В больших полях ($H > 0.2$ Т) наблюдаются осцилляции фототоков с шубниковским периодом. В малых полях ($H < \frac{H_c}{2} = 0.1174T$) наблюдаются осцилляции с периодом MRO, причём сигналы с внутренних контактов находятся в противофазе с сигналами с внешних контактов. В нулевом поле сигналы зануляются.

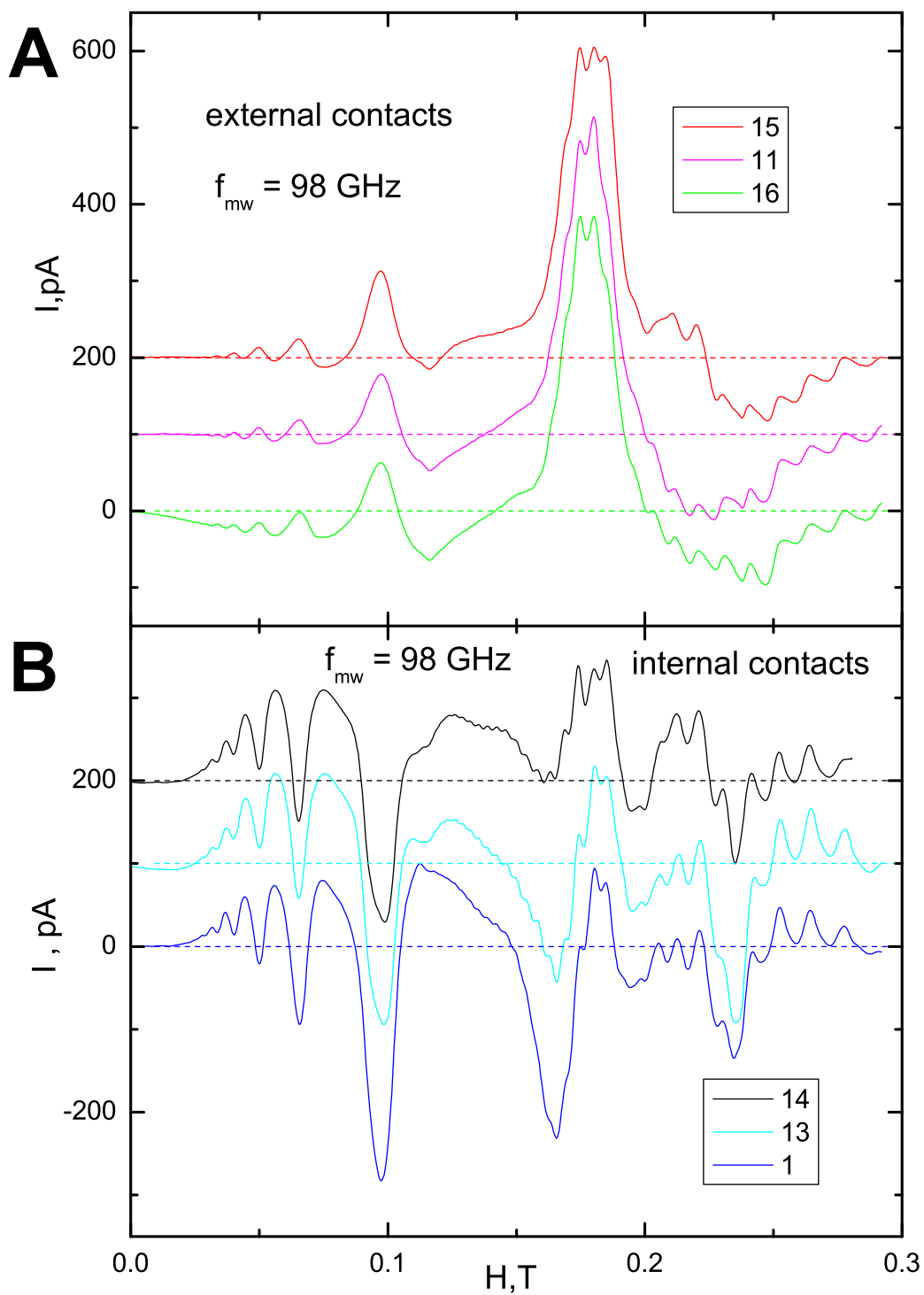


Рис. 10: Зависимости фототока между затвором и различными внешними(внутренними) контактами ,панель A(B). Частота МВ-излучения - $F_{MW} = 98.00 \text{ GHz}$. Подробности см. в основном тексте.

7. Фототок при различных затворных напряжениях.

На панели А рисунка 11 изображены зависимости фототоков между затвором и внешним(15-ым) контактом при различных затворных напряжениях V_g . Чёрная кривая соответствует $V_g = +0V$, красная - $V_g = -0.25V$, зелёная - $V_g = -0.5V$, синяя - $V_g = -0.8V$. Чёрная, красная, зелёная и синяя горизонтальные пунктирные линии обозначают нули соответствующих фототоков(кривые, кроме синей, сдвинуты вдоль оси токов для удобства сравнения).

Важным наблюдением, следующим из приведенных данных, является значительное уменьшение амплитуды осцилляций вплоть до их полного подавления, происходящее при увеличении амплитуды отрицательного затворного напряжения. Схожее поведение демонстрируют и другие внешние контакты.

На панели В рисунка 11 изображены зависимости фототоков между затвором и внутренним(14-ым) контактом при различных затворных напряжениях V_g . Чёрная кривая соответствует $V_g = +0V$, красная - $V_g = -0.25V$, зелёная - $V_g = -0.5V$, синяя - $V_g = -0.8V$. Чёрная, красная, зелёная и синяя горизонтальные пунктирные линии обозначают нули соответствующих фототоков(кривые, кроме черной, сдвинуты вдоль оси токов для удобства сравнения).

В полях $H < 0.12T$ наблюдаются осцилляции фототока с периодом MRO, причём осцилляции фототока с внутреннего контакта находятся в противофазе с осцилляциями фототока с внешнего контакта. В отличие от внешних контактов отрицательное затворное напряжение увеличивает амплитуду осцилляций. Схожее поведение демонстрируют и другие внутренние контакты, но в некоторых случаях усиление осцилляций при уменьшении затворного напряжения практически не заметно.

8. Сравнение фотоэдс, измеренной прямым методом и вычисленной из фототока.

На рисунке 12 изображено сравнение магнетополевых зависимостей пересчитанного из фототока и измеренного прямым методом фотоэдс между внутренним и внешним контактом. Фотоэдс вычислялось по формуле, приведенной на рисунке 12, из фототока, измеренного при двух различных затворных напряжениях: $V_g = +0V$ (красная кривая) и $V_g = -0.7V$ (чёрная кривая). Также при тех же затворных напряжениях предвари-

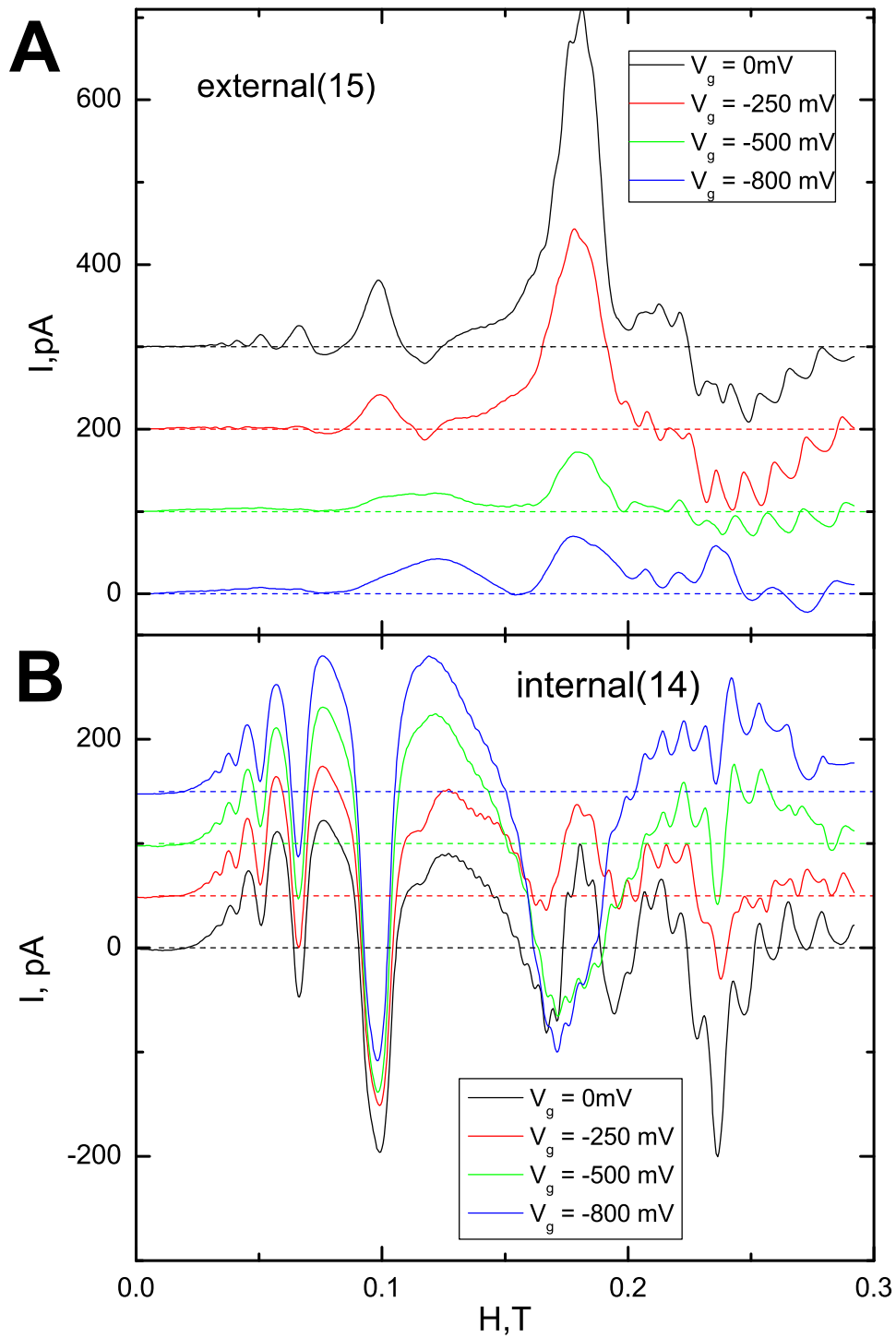


Рис. 11: Зависимость фототока между затвором и внешним(панель А) или внутренним(панель В) контактом при различных затворных напряжениях. Горизонтальные пунктирные линии обозначают нули соответствующих сигналов. Подробности см. в основном тексте.

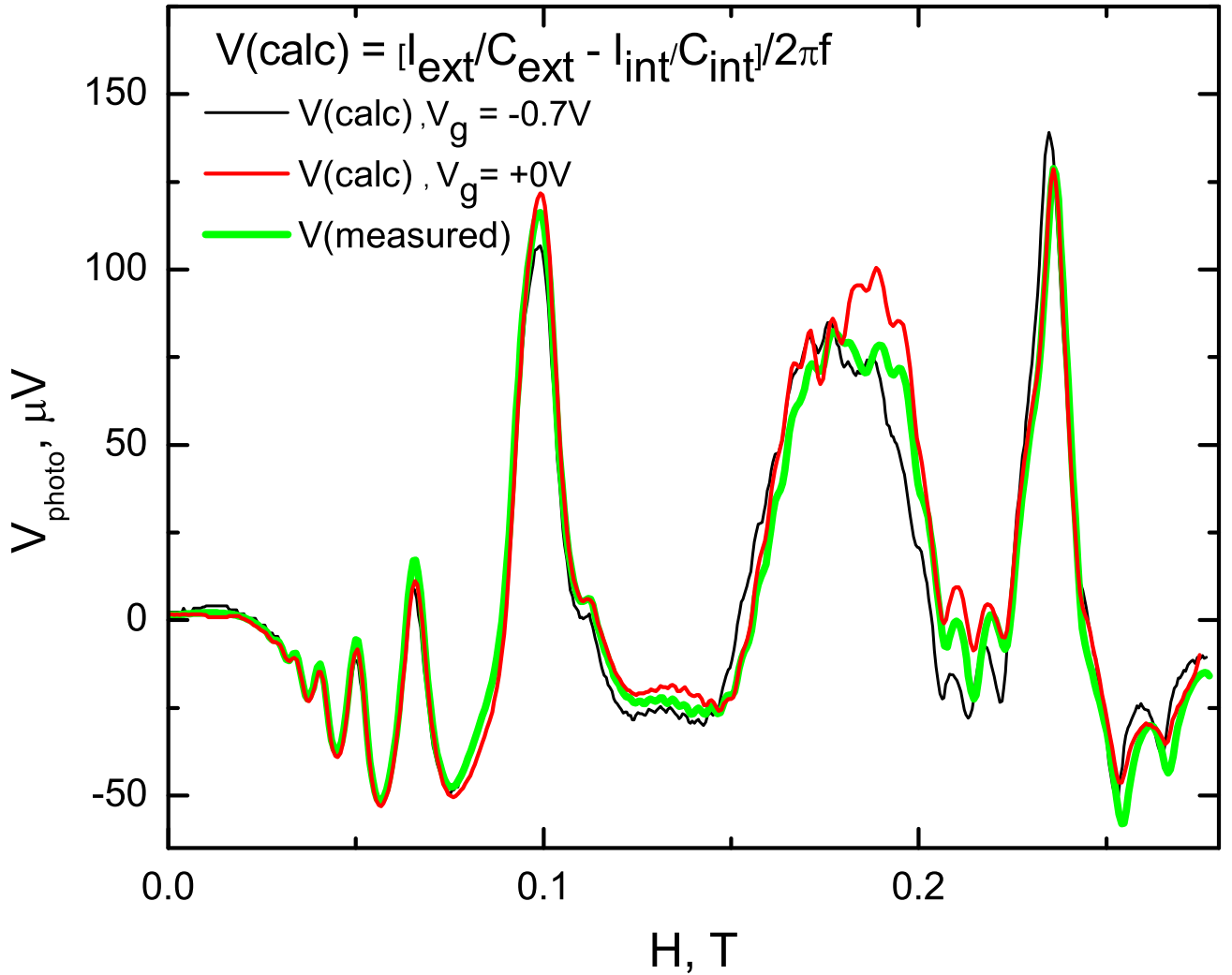


Рис. 12: Сравнение фотоэдс между внутренним и внешним контактом, измеренной прямым методом (зелёная кривая), и фотоэдс, вычисленной из фототоков (красная кривая - при $V_g = +0V$, чёрная кривая - при $V_g = -0.7V$). Формула пересчёта фототока в фотоэдс указана в верхней части графика, где $I_{\text{ext}}(I_{\text{int}})$ и $C_{\text{ext}}(C_{\text{int}})$ соответственно фототок между затвором и внешним(внутренним) контактом и ёмкость между затвором и внешним(внутренним) контактом. Частота МВ-излучения : $F_{MW} = 98.00GHz$

тельно была измерена ёмкость между ДЭС и затвором. В малых полях ($H < 0.1T$) наблюдаются осцилляции всех трёх зависимостей с периодом MIRO. Магнитополевые зависимости фотоэдс, вычисленные из фототоков, измеренных между контактами и затвором, при обоих затворных напряжениях совпадают с измеренной магнитополевой

зависимостью фотоэдс между теми же контактами. Полученные результаты указывают на аддитивность вкладов в фото-ЭДС от электрических полей, существующих в разных областях образца. В результате при вычислении разности фототоков из сигнала выпадает часть, связанная с загибом зон около затвора и остается только разность фото-ЭДС, формирующаяся около внутреннего и внешнего контактов, которая меряется при использовании этих контактов.

V. Обсуждение результатов эксперимента.

Наиболее интересным результатом работы является наблюдение осцилляций фототока, находящихся в противофазе, если используются внутренние или внешние контакты (рис.9А). В терминах формулы (3) для фото-ЭДС это означает, что величина загиба зон U_c имеет разный знак около внутреннего и внешнего контактов. Это заключение подтверждается измерениями с приложением затворного напряжения, производящего противоположный эффект на амплитуду осцилляций тока при использовании внутреннего и внешнего контактов (рис.10). При приложении затворного напряжения мы контролируемым образом меняем загиб зон около границы затвора. Приложение отрицательного напряжения, очевидно, приводит к загибу дна зоны проводимости вверх. Уменьшение (увеличение) амплитуды осцилляций в таких условиях означает уменьшение (увеличение) среднего электрического поля в области образца между затвором и используемым контактом. Таким образом, на основании изменения амплитуды осцилляций мы можем заключить, что загиб зон около внутреннего контакта происходит вниз, а около внешнего - вверх. Мы полагаем, что такое различие связано с различными полями механических напряжений, существующими около контактов, находящихся в средней части мезы и на ее краю. Механические же напряжения связаны с электрическими полями вследствие пьезоэлектрического эффекта в GaAs и материалах на его основе.

В работе [6] в режиме КЭХ было проведено измерение профиля электрического потенциала в ДЭС при той же геометрии образца. Был наблюдён положительный загиб зон вблизи внешнего контакта. Наши измерения подтверждают результат работы [6].

VI. Заключение.

Основные результаты дипломной работы состоят в следующем :

1) Отработана методика измерения фототока между затвором и одним омическим контактом к ДЭС.

2) Обнаружены магнито-осцилляции фототока на гармониках циклотронного резонанса, оказавшиеся в противофазе при использовании внутреннего и внешнего контактов.

3) Измерена зависимость амплитуды осцилляций от напряжения на затворе. Полученные результаты указывают на различный по знаку загиб зон около внешнего и внутреннего контактов.

4) Из величины фототока получена осциллирующая зависимость микроволновой фото-ЭДС. Результаты подтверждаются сравнением с прямыми измерениями фото-ЭДС между двумя омическими контактами.

-
- [1] I. A. Dmitriev, A. D. Mirlin, D. G. Polyakov, and M. A. Zudov, Nonequilibrium phenomena in high Landau levels, *Rev. Mod. Phys.* **84**, 1709 (2012).
- [2] S. I. Dorozhkin, I. V. Pechenezhskiy, L. N. Pfeiffer, K. W. West, V. Umansky, K. v. Klitzing and J. H. Smet, Photocurrent and photovoltage oscillations in the two-dimensional electron system: enhancement and suppression of built-in electric fields, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 036602 (2009).
- [3] S. I. Dorozhkin, I. A. Dmitriev and A. D. Mirlin, Negative conductivity and anomalous screening in two-dimensional electron systems subjected to microwave radiation, *Physical Review* **B 84**, 125448 (2011).
- [4] I. A. Dmitriev, S. I. Dorozhkin and A. D. Mirlin, Theory of microwave-induced photocurrent and photovoltage magneto-oscillations in a spatially nonuniform two-dimensional electron gas, *Phys.Rev.***B 80**, 125418 (2009).
- [5] Michael J. Manfra, Molecular Beam Epitaxy of Ultra-High-Quality AlGaAs/GaAs Heterostructures:Enabling Physics in Low-Dimensional Electronic Systems, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **5**, 347 (2014).
- [6] E. Ahlswede, J. Weis, K.v. Klitzing, K. Eberl, Hall potential distribution in the quantum Hall regime in the vicinity of a potential probe contact, *Physica* **E 12**, 165 (2002).