

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

РГБ ОД
10 АПР 2000

На правах рукописи

ШАН СИЕН ЮЙ

ЛАЗЕРНАЯ ГИПЕРЗВУКОВАЯ
СПЕКТРОСКОПИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ
КРЕМНИЯ И ГЕРМАНИЯ

01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2000

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Д.Ю. Парашук

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А.Н. Пенин
кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник А.Л. Добряков

Ведущая организация: Институт Общей Физики РАН

Защита состоится "6" апреля 2000 года в 15-00 на заседании диссертационного совета К.053.05.21 Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу : Москва 119899, Воробьевы горы, МГУ, ул. Хохлова, д.1 , конференц-зал им. С.А. Ахманова корпуса нелинейной оптики.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан "17" марта 2000 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

К.053.05.21

кандидат физико-математических наук,

доцент


М.С. Полякова

В379.347,03

В372.18,03

В328.256,03

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

В последнее время большое внимание уделяется исследованию процессов возбуждения акустических волн сверхкороткими лазерными импульсами как в традиционных объектах исследования – металлах и полупроводниках, так и разнообразных новых материалах – в сверхпроводниках, в проводящих полимерах, в квантово-размерных структурах и т.д. С фундаментальной точки зрения взаимодействие предельно коротких акустических импульсов с конденсированными средами затрагивает весь доступный спектр частот акустических фононов, что позволяет исследовать процессы в предельно широкой полосе частот в колебательной подсистеме среды, а также разнообразные явления, где существенна роль взаимодействия фононной и электронной подсистем. В последнем случае имеется в виду широкий класс эффектов, начиная от проявлений электрон-фононного взаимодействия, до вовлекающих спиновые переменные (магноны) и коллективные возбуждения электронов (плазмоны). Гиперзвуковая область частот в конденсированных средах затрагивает ряд фундаментальных явлений важных для целого ряда областей, например, для акустоэлектроники, оптоакустики, магнитоакустики и т.д.

В пикосекундной оптоакустике одной из ключевых проблем оказывается разработка адекватных методов измерения длительности и формы сверхкоротких акустических импульсов, т.е. гиперзвуковых импульсов. Если в ультразвуковом диапазоне частот до сотен мегагерц методы измерения параметров акустических импульсов хорошо разработаны и широко используются на практике, то самая верхняя часть ультразвукового диапазона (0.1–1 ГГц) и гиперзвуковой диапазон (>1 ГГц) остаются труднодоступными. Имеются в виду измерения амплитуд и фаз акустических волн в широкой полосе частот с точностью достаточной для проведения адекватного спектроскопического анализа. Достоинство оптических методов возбуждения и регистрации акустических волн – бесконтактность, высокое пространственное разрешение, возможность использования корреляционных методов с временным разрешением на уровне длительности используемых лазерных импульсов. Данная работа в значительной

степени посвящена разработке метода лазерной гиперзвуковой спектроскопии, основанного на высокочувствительных измерениях малой модуляции оптической мощности.

В настоящее время подробно изучен термоупругий механизм фотовозбуждения акустических волн, значительно в меньшей степени известны другие нетепловые механизмы фотоакустического преобразования, в частности, электронно-деформационный. Последний механизм мгновенно включается при возбуждении электронно-дырочной пары в конденсированной среде и он достаточно хорошо исследован в ковалентных полупроводниках на наносекундной временной шкале. Согласно имеющейся теории, в основном разработанной В.Э. Гусевым, фронт концентрации движущейся электронно-дырочной плазмы в полупроводнике является эффективным источником акустических волн. Исследованию такого механизма фотовозбуждения звука в монокристаллах германия и кремния на пикосекундной временной шкале уделено особое внимание в настоящей работе. Разрабатываемый в данной работе метод гиперзвуковой спектроскопии позволяет дать ответ на вопрос, давно дискутируемый в физике твердого тела, который может быть сформулирован следующим образом: возможно ли направленное движение плазмы электронов и дырок в твердом теле со сверхзвуковой скоростью?

Вышесказанное определяет АКТУАЛЬНОСТЬ диссертационной работы, ЦЕЛЯМИ которой являлись:

1. Экспериментально исследовать форму и особенности распространения акустических импульсов, возбуждаемых пикосекундными оптическими импульсами в монокристаллах германия и кремния.
2. Путем сопоставления теории с экспериментом определить механизмы генерации гиперзвуковых импульсов в кремнии и германии и исследовать факторы, влияющие на длительность и профиль регистрируемых акустических импульсов.
3. Исследовать вопрос о возможности сверхзвукового расширения электронно-дырочной плазмы, возбужденной пикосекундным оптическим импульсом в полупроводниках при комнатной температуре.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

В настоящей работе впервые экспериментально реализован метод дефлекционных измерений с пикосекундным временным разрешением, позволяющий детально измерять *профиль* широкополосных гиперзвуковых импульсов в твердом теле с точностью достаточной для дальнейшего спектроскопического анализа. На основе сопоставления экспериментальных профилей гиперзвуковых импульсов с рассчитанными в рамках известных теоретических моделей разработан оригинальный метод лазерной гиперзвуковой спектроскопии полупроводников, позволяющий установить механизм и параметры оптоакустического возбуждения, рассчитать коэффициент поглощения гиперзвука и промоделировать его дифракцию. Разработанный спектроскопический метод чувствителен к диффузии фотовозбужденной электронно-дырочной плазмы, что позволяет оценить коэффициент ее амбиполярной диффузии. В работе впервые показано, что при комнатной температуре фронт фотовозбуждаемой электронно-дырочной плазмы в полупроводнике может двигаться со сверхзвуковыми скоростями, что дает ответ на вопрос о "звуковом барьере" для направленного движения электронно-дырочной плазмы в полупроводнике.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД СОИСКАТЕЛЯ

Автор настоящей работы самостоятельно разработал пакет программ для компьютерного анализа экспериментальных импульсов гиперзвука и их сравнения с имеющейся теорией. Автор выполнил расчеты модельных профилей и спектров импульсов гиперзвука и провел их сопоставление с экспериментальными данными. Часть экспериментов, представленных в настоящей работе, выполнена автором самостоятельно, а часть – совместно Н.В. Чигаревым. Автор участвовал в создании экспериментальной установки, на которой выполнена настоящая работа.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Разработанный лазерный дефлекционный метод измерений малых смещений поверхности с пикосекундным временным разрешением позволяет измерять форму широкополосных импульсов гиперзвука с полосой 0.1-10 ГГц и чувствительностью 0.1 нм/Гц^{1/2}.

2. Профили оптически возбуждаемых широкополосных импульсов гиперзвука и измеряемых по разработанной дефлекционной методике чувствительны к быстрой диффузии фотовозбуждаемой электронно-дырочной плазмы, что позволяет оценить коэффициент ее амбиполярной диффузии.

3. Из анализа профилей измеряемых импульсов гиперзвука и сопоставления их с имеющимися теоретическими моделями следует, что фронт электронно-дырочной плазмы в полупроводнике, возбуждаемой пикосекундным оптическим импульсом, может двигаться со сверхзвуковой скоростью.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. Разработанная система радиочастотной фоторегистрации с чувствительностью к относительному изменению оптической мощности $\sim 10^{-7} \text{ Гц}^{-1/2}$ может быть использована в различных высокочувствительных оптических измерениях (дефлекционных, поляриметрических, денситометрических, и т.д.) с пико и фемтосекундным временным разрешением.

2. Разработанные методы оптического возбуждения и регистрации импульсов гиперзвука могут составить основу новых оптоакустических методик диагностики и неразрушающего контроля материалов в гиперзвуковом диапазоне частот.

АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты работы представлялись на IX Международной конференции по фотоакустическим и фототепловым явлениям (Нанкин, КНР, 1996, приглашенный доклад); Конференции молодых ученых в рамках мемориальных мероприятий, посвященных 70-летию Р.В.Хохлова (Москва, Россия, 1996), XV Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (С.-Петербург, Россия, 1995), II Международном симпозиуме по современным проблемам лазерной физики (Новосибирск, Россия, 1997), XVI Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (Москва, Россия, 1998). По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ПЕРВАЯ ГЛАВА посвящена литературному обзору по вопросу о сверхзвуковом движении свободных носителей заряда в полупроводниках. Взаимодействие носителей заряда и акустических волн – классическая задача физики конденсированных состояний. Одна из важных проблем связана с направленным движением носителей заряда с дозвуковой или сверхзвуковой скоростями. Данную проблему можно сформулировать в виде вопроса: может ли направленное движение свободных носителей в твердом теле иметь сверхзвуковую скорость? С начала 80-х годов этот вопрос активно обсуждался в основном в связи с динамикой электронно-дырочных капель в Ge и Si при температуре в несколько кельвин. Отметим, что все попытки ускорить электронно-дырочные капли до сверхзвуковой скорости не удалось. Также в 80-е годы был выполнен ряд гелиевых экспериментов в целом ряде полупроводников и структурах на их основе, из которых следовали противоречивые выводы относительно наличия "звукового барьера" для направленного движения неравновесной электронно-дырочной плазмы (ЭДП). В обзоре кратко рассмотрены причины торможения быстрого движения ЭДП. Таким образом, до сегодняшнего дня остается неясным – возможно ли направленное движение носителей в твердом теле со скоростью выше звуковой. Разработанный в настоящей работе метод гиперзвуковой спектроскопии чувствителен к быстрой диффузии фотоиндуцированной ЭДП. Это позволяет реализовать новый метод оценки скорости движения фронта ЭДП в полупроводниках и ответить на поставленный выше вопрос о "звуковом барьере".

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ рассмотрены механизмы генерации гиперзвуковых импульсов, возбуждаемых короткими лазерными импульсами (~100 пс). Термоупругий механизм проявляет себя следующим образом: нагрев приповерхностного слоя толщиной порядка глубины проникновения возбуждающего лазерного импульса приводит к нестационарным термоупругим напряжениям и, следовательно, возбуждению

акустического импульса. Согласно электронно-деформационному механизму возбуждения акустических импульсов, любое пространственно-неоднородное изменение концентрации свободных носителей заряда вызывает возбуждение акустических волн. Характерный параметр для эффективности электронно-деформационного механизма – величина деформационного потенциала среды. В работе приведены одномерные линейные уравнения для пространственно-временной динамики фотоиндуцированной ЭДП и повышения температуры кристаллической решетки и их решения в спектральном виде. Эти решения используются далее для компьютерного моделирования профилей гиперзвуковых импульсов для задач термоупругого и электронно-деформационного возбуждения звука. Далее учтены эффекты дифракции в квазиоптическом приближении и поглощения гиперзвука. Затем проведен анализ возможности наблюдения сверхзвукового движения фронта концентрации электронно-дырочной плазмы в полупроводнике с помощью фотоакустической методики. Ее суть заключается в следующем. Рассмотрим образец, толщина которого много больше глубины проникновения возбуждающего излучения, и будем измерять время прихода акустического импульса к задней грани образца. Предположим, что длительность возбуждающего лазерного импульса много меньше характерного времени возбуждения акустического импульса через электронно-деформационный механизм. В таком случае источником звука будет движущийся фронт ЭДП, поскольку эффективность возбуждения звука пропорциональна градиенту концентрации ЭДП. Следовательно, если фронт ЭДП движется со сверхзвуковой скоростью, то время появления акустического импульса на задней грани кристалла, отсчитываемое от момента лазерного возбуждения, будет меньше времени пробега звука по толщине образца. Таким образом, акустический импульс, сформированный в области движущегося фронта ЭДП, придет к задней поверхности раньше, чем акустический импульс, возбужденный непосредственно в области поглощения лазерного импульса. Из разницы указанных времен можно оценить характерную скорость движения фронта ЭДП. Такие рассуждения справедливы как для гидродинамического, так и для диффузионного режима движения ЭДП.

Только для последнего следует ожидать уширение фронта возбуждаемого акустического импульса. Для диффузионного режима движения ЭДП в работе приведено определение характерной "скорости" диффузии V_D :

$$-Dn_z = nV_D,$$

где n – концентрация свободных носителей, D – коэффициент амбиполярной диффузии, z – координата нормально к поверхности и n_z – производная n по z . Показано, что при комнатной температуре в монокристалле Ge может быть реализован режим сверхзвукового движения фронта фотозвозбуждаемой ЭДП, который по оценкам должен длиться около 200 пс.

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ представлены: принцип дефлекционных измерений, экспериментальная установка и аппаратура высокочувствительной радиочастотной фоторегистрации для задач оптоакустики. Дефлекционный метод измерения смещений поверхности твердых тел основан на измерении малых наклонов поверхности, вызванных поверхностной деформацией. Малый наклон деформированной поверхности приводит к отклонению зондирующего пучка и его поперечному смещению на фотодетекторе. При измерении малого поперечного смещения лазерного пучка обычно это смещение преобразуют в изменение тока фотоприемника. Для этого наиболее удобен позиционно-чувствительный детектор (ПЧД), состоящий из двухсекционного фотодиода и схемы вычитания фототоков. Избыточные шумы мощности излучения применяемого нами пикосекундного лазера (Nd:YAG с непрерывной накачкой) спадают с частотой и выше частоты ~ 1 МГц уровень флуктуаций излучения задается пуассоновской статистикой света. Разумно ожидать, что пространственные флуктуации лазерного пучка за счет избыточных шумов также будут спадать с увеличением частоты. В работе разработана система позиционно-чувствительного фотодетектирования на основе техники синхронного усиления в радиодиапазоне (6.2 МГц) с чувствительностью на уровне дробовых шумов фототока. Это позволило значительно сузить рабочую полосу приема, что дало возможность добиться высокой чувствительности и избирательности. В системе фоторегистрации применен принцип двойной модуляции, где оптический сигнал амплитудно про-

дулирован на высокой f_0 (6.2 МГц) и низкой f_1 (800 Гц) частотах. Минимальное пиковое относительное изменение фототока, регистрируемое ПЧД, составляет $5 \times 10^{-7} 1/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$, из которого следует оценка минимально регистрируемого пикового смещения поверхности $\sim 0.1 \text{ нм}/\sqrt{\Gamma\text{ц}}$.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ представлены результаты экспериментов по регистрации оптоакустического отклика поверхности в легированных пластинах Ge и Si. С помощью дефлекционного метода детально исследованы профили импульсов гиперзвука в монокристаллах Ge и Si, возбуждаемых ~ 100 пс лазерными импульсами с длиной волны 1064 и 532 нм. Измерения проведены при различных экспериментальных условиях: длинах распространения 100-2000 мкм, размерах области фотовозбуждения 20-70 мкм, плотностях энергии возбуждения 5-50 мкДж/см².

Типичные дефлекционные сигналы для Ge и их спектры, полученные путем преобразования Фурье, для разных длин распространения гиперзвука представлены на рис. 1, а. Длительность переднего фронта гиперзвуковых импульсов слабо зависит от пройденного пути и имеет характерную величину на уровне $1/e$ 250 ± 50 пс. Спектры гиперзвуковых импульсов сконцентрированы около частоты 1 ГГц как видно на рис. 1, б.

При распространении профиль импульса заметно меняется (рис. 1, а). Дифракция и частотно-зависимое затухание изменяют профиль распространяющегося гиперзвукового импульса. Как видно из спектров на рис. 1, б, поглощение уменьшает вклад высокочастотных компонент, а дифракция ослабляет низкочастотные компоненты.

Для того чтобы избавиться от влияния эффектов распространения на профиль гиперзвуковых импульсов, были проведены эксперименты с зондированием смещения поверхности в области фотовозбуждения. Однако в этом случае возникал дефлекционный сигнал, не связанный с механическим смещением поверхности, а вызванный изменением коэффициента отражения области фотовозбуждения. Чтобы подавить эффект оптического взаимодействия пучков возбуждения и зондирования, мы использовали образец Ge с напыленным дихроичным диэлектрическим зеркалом, пропускавшим лазерный импульс возбуждения на поверхность образца Ge и не позволяющим достигать ее импульсу зондирования. Таким обра-

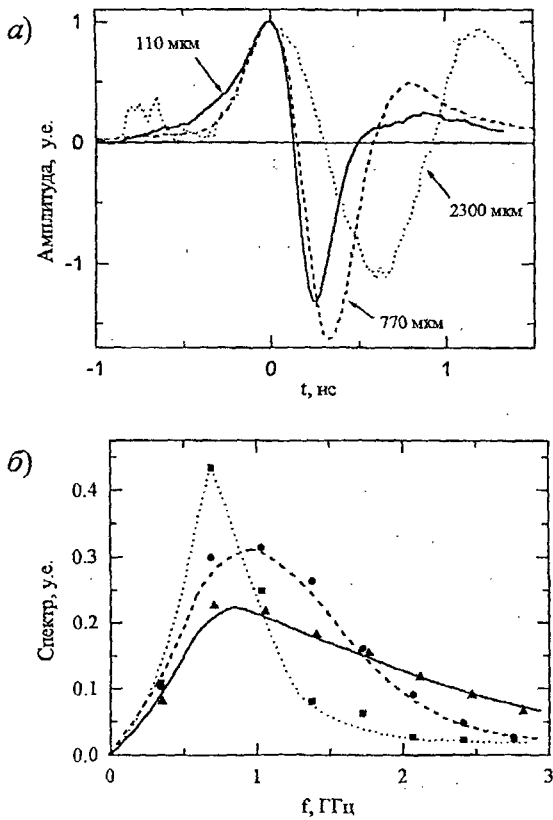


Рис. 1: Дефлекционные сигналы (а) и их спектры (б) для различных длин путей распространения импульсов гиперзвука. Эксперименты проведены с Ge на длине волны возбуждения 1064 нм. Линии на рис. б проведены для удобства представления.

зом, было получено, что профиль импульса гиперзвука вблизи области фотовозбуждения имеет *однополярную* форму. Следовательно, мы приходим к выводу, что вторая фаза импульса гиперзвука при длине распространения порядка 100 мкм и более (рис. 1, а) связана с эффектом распространения гиперзвука, а не его возбуждения. Этот вывод подтверждают результаты теоретического моделирования, проведенного в работе.

Для сопоставления эффективностей электронно-деформационного и термоупругого механизмов возбуждения звука в Ge были проведены сравнительные эксперименты по возбуждению гиперзвука в Ge и в Al на поверхности Ge. Экспериментально показано, что термоупругий механизм возбуждения звука в Ge как минимум на порядок величины менее эффективен, чем электронно-деформационный.

ПЯТАЯ ГЛАВА посвящена анализу полученных экспериментальных результатов. Для сопоставления результатов экспериментов (Глава 4) с теорией (Глава 2) был разработан пакет программ для моделирования фотовозбуждения импульсов гиперзвука с учетом термоупругого и электронно-деформационного механизмов возбуждения, а также эффектов поглощения и дифракции. В работе учтены факторы, влияющих на профиль и длительность полученных в эксперименте импульсов, в частности, промоделированы геометрические эффекты, возникающие при дефлекционном методе измерений, проанализирована роль поверхностной рекомбинации ЭДП. В результате анализа результатов экспериментов установлено, что в монокристаллах Ge и Si при поглощении пикосекундных лазерных импульсов возбуждаются импульсы гиперзвука посредством электронно-деформационного механизма. Показано, что вклад термоупругого механизма возбуждения звука в Ge незначителен. Также подробно проанализированы сигналы фотоиндуцированного отражения лазерного пучка от поверхности Ge. В работе промоделированы эффекты дифракции и поглощения гиперзвука в Ge, получен коэффициент поглощения гиперзвука. На рис. 2 приведены расчетные профили импульсов гиперзвука для разных длин распространения и экспериментальный импульс, полученный при длине распространения 110 мкм. Видно, что

использованная модель хорошо описывает фронты экспериментальных импульсов, но дает существенно более длительную вторую фазу по сравнению с наблюдаемой в эксперименте (ср. также с рис. 1, а). В диссертации выяснены причины несовпадения модельных профилей импульсов гиперзвука с экспериментальными, показано, что "быстрая" вторая фаза связана с недооценкой эффектов дифракции, рассматриваемых в рамках квазиоптического приближения. Далее в работе проанализированы эксперименты с многослойными диэлектрическими покрытиями на Ge. Показано, что эффекты взаимодействия импульса гиперзвука и оптического импульса в многослойном покрытии заключаются главным образом в задержке появления дефлекционного сигнала, связанной со временем прохода импульса гиперзвука по толщине покрытия и его временном уширении.

Заключительная часть данной главы посвящена анализу эффекта быстрой диффузии фотовозбужденной ЭДП. Показано, что разработанный метод лазерной гиперзвуковой спектроскопии даст возможность наблюдать эффект быстрого расширения ЭДП по фронту возбужденного ЭДП импульса гиперзвука. Установлено, что 250-пс фронт наблюдаемых импульсов гиперзвука связан главным образом с процессом диффузии фотовозбужденной ЭДП, а не с эффектами распространения или методическими артефактами. Модельные импульсы на рис. 2 построены для коэффициента амбиполярной диффузии ЭДП $D = 60 \text{ см}^2/\text{с}$. Согласно результатам Главы 2, указанная величина коэффициента диффузии отвечает движению фронта ЭДП со сверхзвуковой скоростью V_D . На вставке рис. 2 приведены фронты расчетных импульсов, отвечающие дозвуковой диффузии для обеих длин волн возбуждения в сравнении с экспериментом (экспериментальные импульсы с возбуждением на λ_2 и λ_1 совпадают в пределах нашей точности измерений). Модельные фронты построены для случая дозвуковой диффузии, отвечающей числу Маха $V_D/c_a = 0.5$ (c_a — продольная скорость звука): $D = 20$ и $0.5 \text{ см}^2/\text{с}$ для возбуждения на λ_1 и λ_2 , соответственно. Из проведенного анализа получено, что характерная скорость движения фронта концентрации ЭДП V_D при ее диффузии для длины волны возбуждения 1064 нм превышает продольную скорость

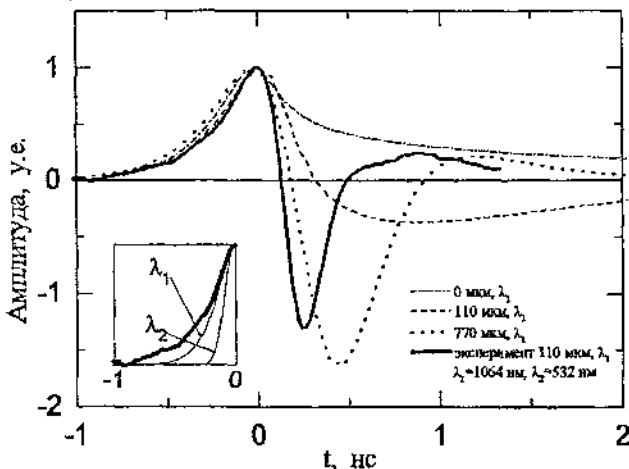


Рис. 2: Расчетные и экспериментальные профили импульсов гиперзвука на длине возбуждения λ_1 . На вставке показаны фронты экспериментального и модельных импульсов (тонкие линии, случай дозвуковой диффузии).

звука в 1.5 раза, а для возбуждения на 532 нм – не менее чем в 1.5 раза. Таким образом, впервые наблюдался эффект сверхзвукового движения фронта ЭДП в полупроводнике при комнатной температуре. В конце данной главы обсуждаются причины торможения быстрого диффузионного расширения фотовозбуждаемой ЭДП.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ сформулированы основные результаты и выводы диссертации:

1. Разработан метод лазерной гиперзвуковой спектроскопии полупроводников с чувствительностью к механическому смещению поверхности на уровне $0.1 \text{ нм/Гц}^{1/2}$, основанный на измерении форм сверхкоротких акустических импульсов с полосой 0.1-5 ГГц и их анализе в рамках известных теоретических моделей возбуждения и распространения гиперзвука.

2. Проведено компьютерное моделирование профилей гиперзвуковых импульсов в спектральном диапазоне 0.1-10 ГГц, описывающее механизмы возбуждения гиперзвука (термоупругий и электронно-деформационный) и эффекты его распространения (дифракция, поглощение). Выполнено сравнение модельных расчетов с данными экспериментов в монокри-

сталлах Si и Ge. Показано, что фронт измеряемых импульсов гиперзвука чувствителен к диффузии фотовозбуждаемой электронно-дырочной плазмы.

3. Показано, что при поглощении полупроводником (Si, Ge) пикосекундного оптического импульса электронно-деформационный механизм возбуждения звука является основным.

4. Выявлена причина несовпадения профилей модельных импульсов гиперзвука с экспериментальными на длинах распространения > 100 мкм, т.е. появление "быстрой" второй фазы в измеряемом импульсе. Показано, что используемое нами квазиоптическое приближение не описывает адекватно эффект дифракции импульсов гиперзвука.

5. Из результатов анализа измеренных профилей гиперзвука следует, что фронт концентрации электронно-дырочной плазмы, возбужденной в монокристалле Ge при комнатной температуре пикосекундным оптическим импульсом длительностью ≈ 100 пс, движется со сверхзвуковой скоростью, превышающей продольную скорость звука не менее чем в 1.5 раза.

6. Разработан метод измерения профиля импульсов гиперзвука вблизи области их фотовозбуждения. Проведены эксперименты на образцах Ge с многослойным диэлектрическим покрытием из которых следует, что профиль возбуждаемого импульса гиперзвука – однополярный, как и предсказывает использованная нами теория фотовозбуждения звука.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах :

1. Paraschuk D.Yu., Kulakov T.A., Nedopekin O.Yu., Chigarev N.V., Pan X.Y., Avancsyan S.M. Precise photodetection with quantum-noise-limit sensitivity for picosecond laser measurements: detection of a few femtometers surface displacements with photodeflection technique.// 15th International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, June 27 - July 1, 1995, St. Petersburg, Technical digest, 1995, vol.2, pp.202-203.

2. Paraschuk D.Yu., Kulakov T.A., Nedopekin O.Yu., Chigarev N.V., Pan X.Y. Precise photodetection with shot-noise-limit sensitivity for picosecond laser measurements: detection of small surface gradients with photodeflection

technique.// Proc. SPIE, 1996, vol. 2799, pp.392-396.

3. Paraschuk D.Yu., Chigarev N.V., Kulakov T.A., Pan X.Y., and Gusev V.E. Transient hypersound spectroscopy in semiconductors.// 9th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, June 27 - 30, 1996, Nanjing, China, Conference Digest, 1996, p.347 (invited paper).

4. Paraschuk D.Yu., Kulakov T.A., Nedopekin O.Yu., Chigarev N.V., Pan X.Y. Shot-noise-limited radio-frequency lock-in photodetection with a continuous wave mode-locked laser.// Rev. Sci. Instrum., 1997, N.11, pp.3989-3991.

5. Paraschuk D.Yu., Chigarev N.V., and Pan X.Y. Quantum-noise-limited measurements with ultrashort laser pulses.// The Second International Symposium on Modern Problems of Laser Physics, July 28 - August 2, 1997, Novosibirsk, Technical Digest, 1997, Part 2, p.10.

6. Chigarev N.V., Paraschuk D.Yu., and Pan X.Y. Hypersound pulses in semiconductors: photoexcitation, propagation and photodetection.// XVI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, June 29 - July 3, 1998, Moscow, Advance program, 1998, p.60.

7. Chigarev N.V., Paraschuk D.Yu., Nedopekin O.Yu., Pan X.Y. Picosecond polarimetry and deflectometry with quantum-noise-limited sensitivity.// XVI International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, June 29 - July 3, 1998, Moscow, Advance program, 1998, p.62.

8. Чигарев Н.В., Недопекин О.Ю., Пан Ю.С., Парашук Д.Ю. Радиочастотная техника синхронного приема с двойной модуляцией для лазеров сверхкоротких импульсов.// Приборы и техника эксперимента, 1998, N.4, с.111-115.