

УДК 538.958

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕРАГЕРЦЕВЫХ ВОЛН ВДОЛЬ ТОНКИХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН GaAs

© 2017 г. А. С. Курдюбов, А. В. Трифионов, И. Я. Герловин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный университет.

E-mail: kurdyubov@yandex.ru

С использованием терагерцевой спектроскопии с временным разрешением изучены особенности распространения терагерцевых волн в тонких образцах полуизолирующего GaAs. Обнаружено, что при фокусировке терагерцевого излучения в торец кристаллической пластины на приемник попадают не только импульсы излучения, прошедшие через кристалл, но и периодическая последовательность дополнительных импульсов, предшествующих прошедшему через кристалл импульсу. Мы предполагаем, что они соответствуют поверхностным волнам, рожденным излучением, испытавшим одно или несколько внутренних отражений от боковых поверхностей кристалла. Подсветка образца в спектральной области примесного поглощения приводит к поглощению терагерцевого излучения в кристалле, что проявляется в экспериментально наблюдаемом ослаблении дополнительных импульсов.

DOI: ...

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к электромагнитным волнам, относящимся к терагерцевой области частот, вызван крайне полезными с практической точки зрения особенностями взаимодействия терагерцевого излучения с веществом. Терагерцевое излучение, соответствующее спектру колебательных возбуждений большинства молекул, позволяет однозначно идентифицировать различные молекулярные соединения, а также выборочно воздействовать на них. Терагерцевые приборы в настоящее время активно внедряются в системах безопасности, медицине, контроле качества и т. д. Не менее важной областью применения терагерцевого излучения являются телекоммуникации, что обусловлено постоянно растущими требованиями к скорости передачи информации. Для активного освоения терагерцевого диапазона, помимо источников и приемников терагерцевого излучения, необходимы эффективные модуляторы излучения, без которых, в частности, терагерцевые телекоммуникации невозможны в принципе.

Для модуляции терагерцевого излучения может быть использован эффект фотоиндуцированного поглощения терагерцевых волн, продемонстрированный в работе [1]. Эффект экспериментально наблюдали на пластинах монокристаллического GaAs, изготавливаемых в качестве подложек для эпитаксиального роста полупроводниковых наноструктур. Терагерцевое излучение фокусировалось на торец пластины, и изучали влияние

дополнительной оптической подсветки на прохождение излучения сквозь кристалл. В настоящем сообщении обсуждаются детали прохождения терагерцевого импульса через кристалл в такой геометрии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Условия экспериментов подробно описаны в работе [1]. Для исследований использовалась установка, реализующая метод терагерцевой спектроскопии с временным разрешением [2]. Генерация терагерцевого излучения осуществлялась путем облучения нелинейного кристалла ZnTe фемтосекундными импульсами перестраиваемого титан-сапфирового лазера. С помощью пары внеосевых параболических зеркал терагерцевое излучение перефокусировалось на образец. Образец помещали в гелиевый криостат замкнутого цикла, допускавший охлаждение до температуры $T = 3.5$ К. С помощью второй пары внеосевых параболических зеркал прошедшее через образец терагерцевое излучение перефокусировалось на второй нелинейный кристалл ZnTe, входящий в систему детектирования сигнала. Линейное двулучепреломление, индуцированное электрическим полем терагерцевой волны, меняло поляризацию проходящего через кристалл зондирующего лазерного луча. Это изменение регистрировалось с помощью стандартной поляризационной балансной схемы. Оптическая линия задержки в канале

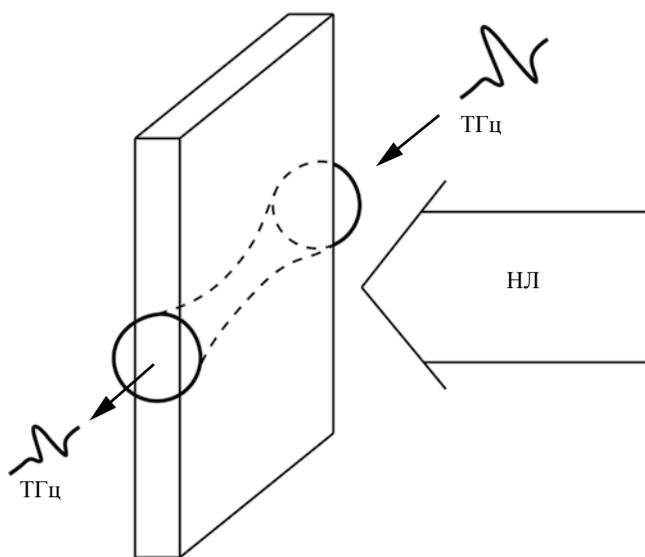


Рис. 1. Геометрия эксперимента. Обозначения: ТГц — терагерцевое излучение, фокусируемое на торец образца GaAs, НЛ — излучение непрерывного лазера.

опорного пучка позволяла контролируемым образом изменять временной интервал между терагерцевым и зондирующим импульсами. Зависимость амплитуды сигнала от величины задержки непосредственно отражала осцилляции электрического поля на терагерцевой частоте.

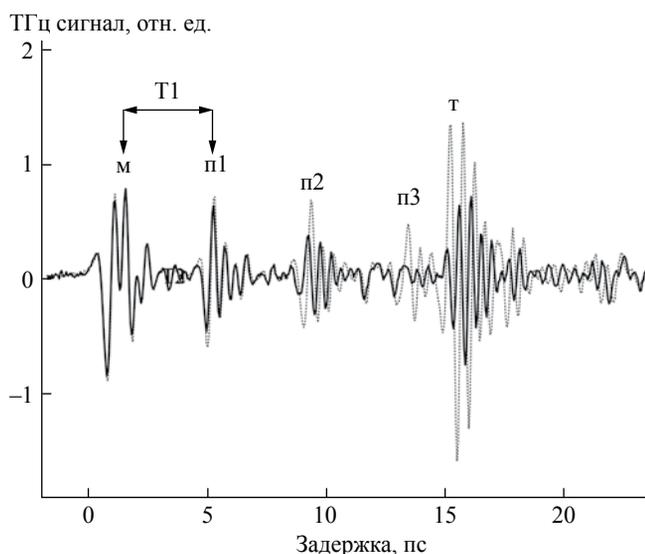


Рис. 2. Временные профили электрического поля терагерцевых импульсов в образце О1 из полуизолирующего GaAs, измеренные при температуре 4 К. Пунктирной линией изображен профиль терагерцевого импульса без дополнительной подсветки, сплошной — профиль при подсветке непрерывным лазером с энергией излучения 1494 мэВ и мощностью 30 мВт. Особенности, обозначенные символами “м”, “п1”, “п2”, “п3” и т. д., обсуждаются в основном тексте.

Исследовали три образца (обозначаемые, в дальнейшем, О1, О2 и О3), представлявшие собой пластины полуизолирующего GaAs, толщиной 350 мкм (образцы О1 и О2) и 390 мкм (образец О3). Для регистрации фотоиндуцированного поглощения образец дополнительно подсвечивался непрерывным излучением титан-сапфирового лазера, перестраиваемым в диапазоне 1470–1520 мэВ. Мощность подсветки составляла около 30 мВт, диаметр пятна фокусировки — около 500 мкм. Подсвечивающее излучение направлялось по нормали к плоскости образца, т.е. перпендикулярно направлению распространения терагерцевого излучения, фокусируемого в торце образца (см. рис. 1). Вследствие малой толщины образцов, сопоставимой с длиной волны терагерцевого излучения (порядка 300 мкм), часть терагерцевого излучения неизбежно проходила мимо образца и тоже попадала на детектор.

На рис. 2 показана форма сигналов, зарегистрированных на образце О1. Видно, что в сигнале присутствуют не один, а несколько импульсов. Задержанным во времени терагерцевым импульсам “т”, прошедшим через образец, предшествуют импульсы, обозначенные как “м”, обусловленные терагерцевым излучением, прошедшим мимо образца. Задержка импульсов “т” относительно “м” обусловлена меньшей скоростью распространения излучения в образце, $v = c/n$, где c — скорость света в вакууме и $n = 3.6$ — показатель преломления кристалла GaAs для терагерцевых волн [3]. Измеренные временные задержки импульсов “т” хорошо описываются выражением: $\Delta t = L/v - L/c$, где L — длина образца. Установка диафрагмы (металлической шторки) перед торцом образца О1, перекрывающей излучение, проходящее мимо него на детектор, практически полностью подавляет импульс “м”, что убедительно подтверждает его природу.

Помимо описанных импульсов в сигналах наблюдаются также дополнительные импульсы “п”, расположенные во времени между импульсами “м” и “т”. Анализ природы этих импульсов — основная тема настоящего сообщения. Как видно из рис. 2, амплитуда импульсов “т”, прошедших через кристалл, уменьшается при дополнительном облучении образца непрерывным лазерным светом, что указывает на наличие фотоиндуцированного поглощения этих импульсов в кристалле [1]. Существенно, что дополнительные импульсы “п” тоже уменьшаются по амплитуде при наличии подсветки, т.е. они тоже связаны с прохождением сквозь объем кристалла.

Как показали результаты экспериментов, дополнительные импульсы наблюдаются не только в криогенных условиях, но и при комнатной температуре, что демонстрирует рис. 3, на котором приведены терагерцевые профили сигналов для

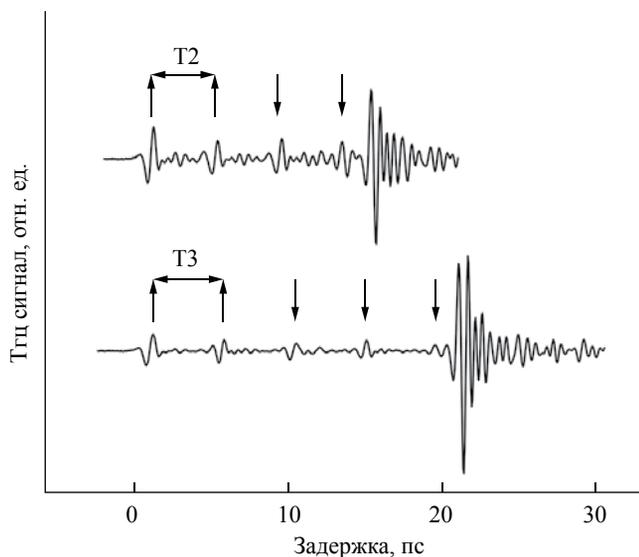


Рис. 3. Временные профили терагерцевых импульсов в образцах O2 (сверху) и O3 (снизу), измеренные при температуре 295 К. Период следования импульсов в образце O2 – $T_2 \approx 4.15$ пс, образце O3 – $T_3 \approx 4.5$ пс.

образцов O2 и O3 при температуре 295 К. В образцах O2 и O3 (см. рис. 3), различающихся по длине, наблюдается различное количество дополнительных импульсов. При этом можно отметить следующие закономерности.

1. В обоих случаях дополнительные импульсы следуют со строгой периодичностью.
2. Периоды следования импульсов не зависят от длины образца.
3. Периоды увеличиваются пропорционально толщине образца.

Приведенные на рис. 3 данные позволили оценить длину пути терагерцевого импульса в кристалле, пройденного за время одного периода. Оценка показала, что в обоих случаях эти длины примерно в 1.4 раза превышают толщины образцов. Исходя из этого, можно предположить, что терагерцевые волны, ответственные за возникновение дополнительных импульсов распространяются под углом примерно 45° к поверхности кристалла.

Существует еще несколько особенностей, отличающих импульсы “п” от основных импульсов “м” и “т”. Во-первых, импульсы “п” наблюдаются только при поляризации терагерцевой волны, перпендикулярной поверхности кристалла, в то время как амплитуды импульсов “м” и “т” от поляризации не зависят. Во-вторых, амплитуды импульсов “п” существенно изменяются в зависимости от того, с какими средами граничит исследуемый кристалл. В частности, амплитуды максимальны в случае свободных поверхностей, сохраняются при наклеивке образца одной плоскостью на металлическую

пластину, но исчезают, когда кристалл зажат между двумя металлическими пластинами.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ослабление дополнительных импульсов “п” при непрерывной засветке означает, что они испытывают фотоиндуцированное поглощение, т.е. проходят сквозь толщу кристалла. При этом, однако, их задержка по времени существенно меньше, чем для импульсов “т”, прошедших через весь кристалл. Мы полагаем, что природа этих импульсов связана с терагерцевой волной, дифрагировавшей на торце образца и распространяющейся по кристаллу, поочередно отражаясь от его боковых границ (см. рис. 4). При каждом отражении в воздухе может породиться рассеянная волна, быстро достигающая фотоприемника. Связанные с ней импульсы будут задержаны относительно импульса “м” на время прохождения волны поперек кристаллической пластины. Одновременно может родиться поверхностная волна, распространяющаяся по границе кристалл-воздух со скоростью, близкой к скорости света. Эти волны породят такую же периодическую последовательность импульсов, лежащих во временном интервале между импульсами “м” и “т”. В пользу того, что именно поверхностные волны являются источниками дополнительных импульсов, свидетельствует тот факт, что дополнительные импульсы видны только при поляризации терагерцевых волн, перпендикулярной поверхности исследуемых образцов. Как известно [4], именно так должен быть ориентирован вектор электрического поля в поверхностной волне, тогда как амплитуда волны, распространяющейся по воздуху не должна зависеть от ее поляризации.

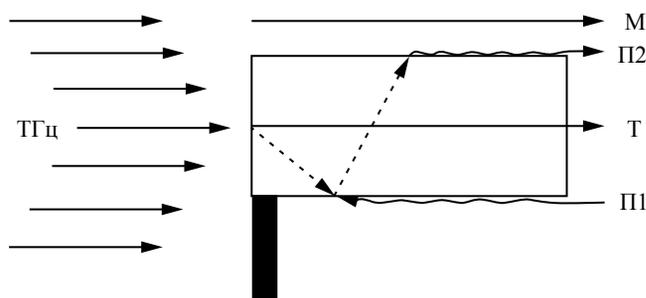


Рис. 4. Схема прохождения терагерцевых импульсов через кристалл GaAs. Обозначения: “т” – импульс, прошедший через толщину образца, “м” – импульс, прошедший мимо образца, “п1” и “п2” – дифрагировавшие импульсы, распространяющиеся по поверхности образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что прохождение терагерцевого излучения вдоль полупроводниковой пластины, толщина которой сопоставима с длиной волны, сопровождается дополнительными эффектами, связанными с рождением поверхностных волн на границах раздела. Наличие этих эффектов может оказаться полезным для терагерцевого анализа молекулярных систем, нанесенных на поверхность кристалла. Кроме того, возможность рождения поверхностных волн следует учитывать при разработке модуляторов терагерцевого излучения на полупроводниковых кристаллах.

Авторы благодарят И.В. Игнатъева за плодотворное обсуждение и ресурсный центр “Нанопотоника”

и МРЦ по направлению “Нанотехнологии” СПбГУ за техническую поддержку работы. Работа поддержана грантом РФФИ № 15-59-30406 РТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курдюбов А.С., Трифонов А.В., Герловин И.Я. и др. // Физика тв. тела. 2017. Т. 59. № 7. С. 1274.
2. Zhang X.-C., Xu J. Introduction to THz Wave Photonics. New York: Springer, 2010. P. 49.
3. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. New York: Springer, 2009. P. 166.
4. Князев Б.А., Кузьмин А.В. // Вестник НГУ. 2007. Серия: Физика. Т. 2. № 1. С.