

Механизм терагерцовой фотопроводимости в полуметаллических квантовых ямах HgTe/CdHgTe

© Ю.Б. Васильев[¶], Н.Н. Михайлов[†], F. Gouider[‡], Г.Ю. Васильева^{*}, G. Nachtwei[‡]

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

[†] Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

[‡] Институт прикладной физики,
38106 Брауншвейг, Германия

^{*} Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 16 ноября 2011 г. Принята к печати 21 ноября 2011 г.)

Проведены исследования терагерцовой фотопроводимости в магнитных полях в полуметаллических квантовых ямах HgTe/CdHgTe. Основной вклад в фотопроводимость дает сигнал, возникающий из-за разогрева электронного газа. Показано, что при выполнении условия циклотронного резонанса сигнал фотопроводимости состоит из циклотронно-резонансной и болометрической компонент, однако и в этом случае болометрический вклад является преобладающим.

В настоящее время методами молекулярно-пучковой эпитаксии изготавливаются гетероструктуры высокого качества с квантовыми ямами HgTe различной толщины, обладающие интересными физическими свойствами. В частности, было показано, что в случае достаточно широких ям (20–30 нм) слой HgTe является полуметаллом, т.е. имеется перекрытие зоны проводимости и валентной зоны [1]. Такие структуры исследовались магнитотранспортными методами [2] и методами циклотронного резонанса в микроволновой области спектра [3]. Имеется также сообщение о наблюдении фотопроводимости в подобных структурах [4–7]. Были предложены два различных механизма, объясняющие возникновение сигнала фотопроводимости, а именно болометрический [5] и циклотронно-резонансный [4]. Недавно подробные исследования [7] фотопроводимости в структурах с квантовыми ямами HgTe/CdHgTe различной ширины подтвердили, что основным механизмом фотопроводимости является болометрический, однако в широких (20 нм и более) полуметаллических ямах вопрос о механизме фотопроводимости остался открытым. Ответ на этот вопрос очень важен, в частности, для определения эффективной массы носителей из спектров фотопроводимости. Очевидно, что, если преобладает болометрический механизм, эффективная масса электронов, полученная таким методом, будет определена неправильно.

В данной работе приводятся доказательства того, что сигнал фотопроводимости в широких ямах HgTe/CdHgTe содержит одновременно и циклотронно-резонансную, и болометрическую компоненты, причем преобладает вклад от болометрической компоненты. Большая величина фотосигнала, найденная в наших экспериментах, свидетельствует о перспективности таких структур для создания фотоприемников в терагерцовой области спектра.

Исследованные в данной работе образцы представляли собой структуры HgTe/CdHgTe, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии с ориентацией поверхности (013). Толщина ям равна 20.5–21 нм. Подробности методики изготовления таких гетероструктур можно найти в [8].

Исследовались образцы прямоугольной формы размером 2×4 мм. Полосковые омические контакты создавались вдоль узкого края образца методом вжигания индия. Результаты исследований представлены для одного из образцов, в котором концентрация электронов, равная $1.46 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, была определена из осцилляций магнитосопротивления.

В качестве источника терагерцового излучения использовался импульсный лазер на циклотронном резонансе (ЦР/CR) в *p*-Ge с длительностью импульса < 1 мкс и перестраиваемый магнитным поле B в диапазоне длин волн 100–160 мкм (1.87–3 ТГц) [9]. Изменялось изменение падения напряжения на контактах под действием импульсов терагерцового излучения в магнитных полях вблизи факторов заполнения $\nu = 2$ –4.

Зависимости сигнала фотопроводимости от магнитного поля представлены на рис. 1 для трех разных значений частоты излучения лазера. На этом же рисунке показана зависимость сопротивления образца от магнитного поля, измеренная в двухконтактной геометрии. Четко видны два плато на зависимости сопротивления вблизи индукции магнитного поля $B = 3$ и 2 Тл, соответствующие целочисленным факторам заполнения $\nu = 2$ и $\nu = 3$ соответственно. Также видно, что сигнал фотопроводимости возникает вблизи краев плато квантового эффекта Холла и имеет разную полярность в зависимости от того, увеличивается или уменьшается сопротивление детектора под действием излучения. Максимальная величина сигнала получается, если частота излучения лазера совпадает с частотой циклотронного резонанса. На рис. 1 стрелками отмечены магнитные поля, при

[¶] E-mail: yu.vasilyev@mail.ioffe.ru

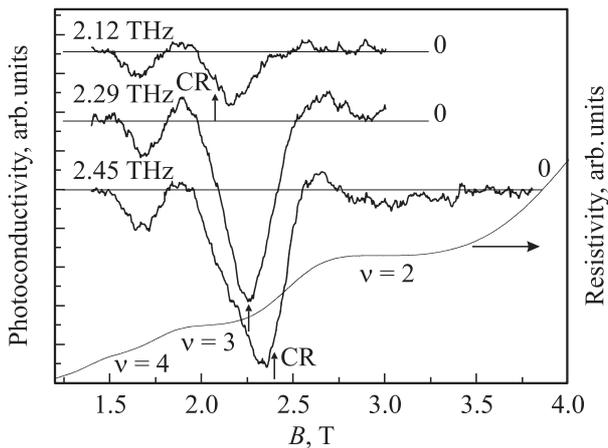


Рис. 1. Сигнал фотопроводимости как функция индукции магнитного поля B для трех значений частоты излучения лазера E_{las} и зависимость сопротивления образца от индукции магнитного поля при напряжении смещения на структуре 0.5 В.

которых выполняется это условие. Важно отметить, что достаточно сильный отрицательный сигнал наблюдается в магнитных полях, далеких от циклотронного резонанса (вблизи фактора заполнения $\nu = 4$). При этом частота излучения значительно превышает циклотронную частоту. Видно, что сигнал фотопроводимости не зависит от частоты излучения в этой области, а значит, определяется разогревом электронного газа. Можно заключить, что поглощение излучения в образце в этом случае приводит к повышению электронной температуры и величина сигнала фотопроводимости определяется температурной зависимостью удельного сопротивления образца.

В области магнитных полей, где выполняются условия циклотронного резонанса, можно предположить, что сигнал фотопроводимости состоит из нескольких компонент. Как было указано ранее, наряду с болометрическим механизмом вклад в сигнал фотопроводимости может вносить и циклотронная составляющая [10]. При этом изменение сопротивления образца происходит не за счет изменения подвижности носителей при их разогреве, как при болометрическом механизме, а за счет изменения числа носителей, участвующих в процессе протекания тока. Особенно заметным такой вклад становится вблизи целочисленных факторов заполнения, где даже небольшое увеличение числа носителей под действием излучения на первоначально почти пустом уровне Ландау приводит к сильному изменению сопротивления образца.

Главное различие в проявлении циклотронно-резонансного и болометрического механизмов заключается в том, что в первом случае положение пика фотопроводимости совпадает с циклотронной частотой, а в другом положении пика связано с положением краев плато квантового эффекта Холла, где величина производной сопротивления от температуры максимальна. Из рис. 1, видно, что в резонансной области положение пика фотопроводимости зависит от частоты излучения

лазера, но положение пика в магнитном поле не следует строго за положением линии ЦР. С целью показать, что в данном случае имеется вклад и от циклотронного механизма, хотя и более слабый, чем болометрический, мы убрали из сигнала фотопроводимости вклад от болометрической составляющей. Для этого было вычислено отношение двух зависимостей фотопроводимости, измеренных при различных частотах излучения лазера E_{las} . Такой метод аналогичен нормировке сигнала при измерении поглощения в магнитном поле с помощью фурье-спектрометра с целью выявления линии циклотронного резонанса. Результат вычислений представлен на рис. 2, где показано относительное изменение фотопроводимости $\Delta\sigma/\sigma_0$ для двух значений частоты излучения лазера. Полученные таким образом максимум и минимум фотопроводимости хорошо аппроксимируются лоренцианом, соответствующим циклотронной частоте электронов.

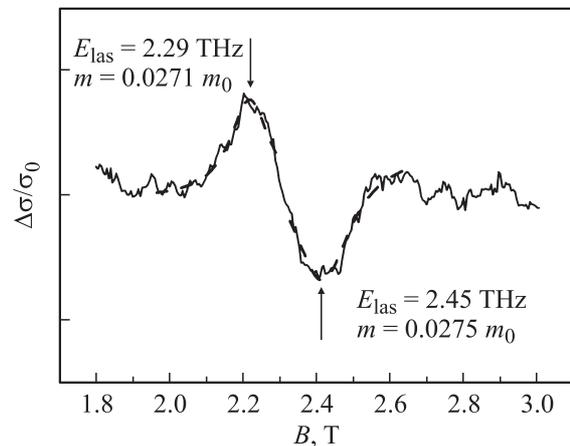


Рис. 2. Относительное изменение сигнала фотопроводимости, определенное для двух значений частоты излучения лазера E_{las} . Штриховая линия расчет, значения эффективной массы m указаны.

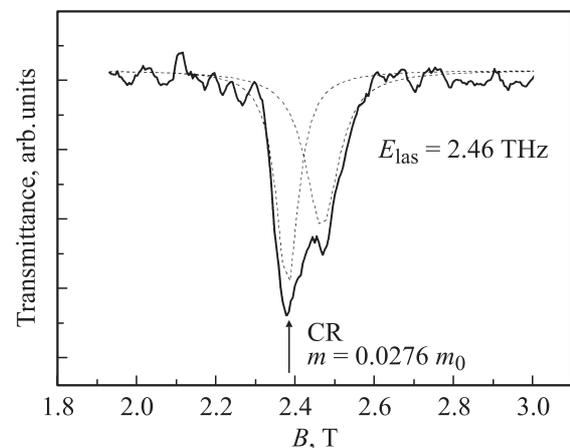


Рис. 3. Циклотронный резонанс, измеренный методом пропускания для частоты излучения лазера 2.46 ТГц. Пунктирные линии — разложение на лоренцианы, значение циклотронной эффективной массы m указано.

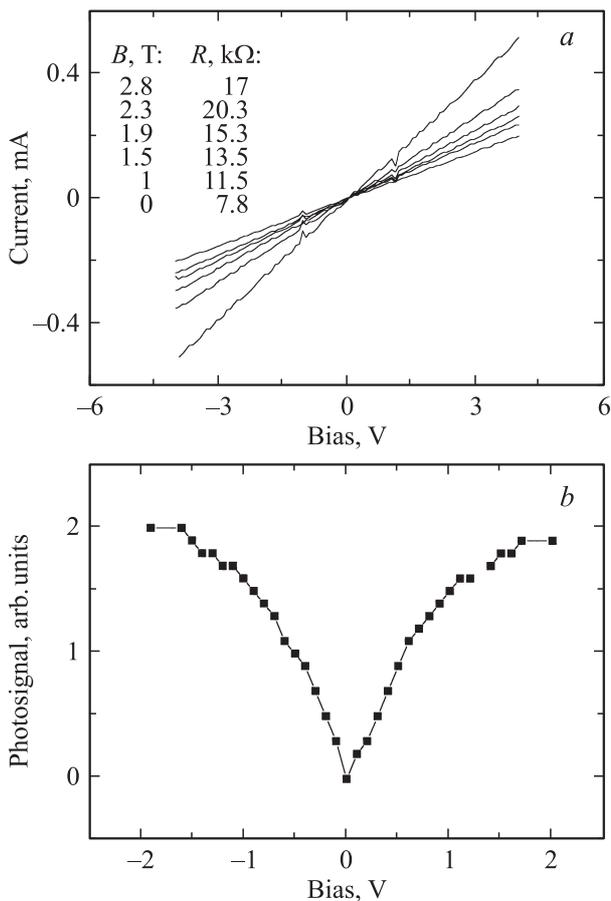


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики фотоприемника для различных значений индукции магнитного поля в геометрии Фарадея (а) и полевая зависимость сигнала фотопроводимости для частоты излучения 2.41 ТГц.

Дополнительно к измерениям фотопроводимости были проведены измерения поглощения на частоте циклотронного резонанса. Регистрировался сигнал, проходящий сквозь образец, с помощью дополнительного приемника, вынесенного за пределы магнитного поля образца. Результат одного такого измерения представлен на рис. 3. Спектр хорошо описывается двумя лоренцианами, которые изображены пунктирными линиями. В спектре поглощения четко видно расщепление линии ЦР, которое отсутствовало в спектре фотопроводимости. Это расщепление связано со спиновым расщеплением и непараболичностью зоны проводимости [11]. Из рис. 2 и рис. 3 видно, что положение линии ЦР в спектре поглощения совпадает с большой точностью с положением максимума спектра фотопроводимости (без болометрической компоненты) при том же значении частоты излучения лазера. Из сравнения ширин на полувысоте линий фотопроводимости (рис. 1) и циклотронного резонанса (рис. 3) видно, что линия циклотронного резонанса примерно в 3 раза уже, чем линия фотопроводимости. При этом линия циклотронного резонанса, полученная вычитанием болометрической компоненты (рис. 2), имеет примерно такую же ширину, что и измеренная по по-

глощению. Это является дополнительным указанием на то, что сигнал фотопроводимости включает компоненту, связанную с циклотронным поглощением, и компоненту, возникающую из-за болометрического эффекта.

Структуры на основе HgTe широко используются для создания фотоприемников инфракрасного диапазона спектра [12]. В терагерцовом диапазоне такие приемники до настоящего времени не применяются, хотя очевидно, что узкозонные структуры с малой эффективной массой m являются перспективными для создания терагерцовых приемников. Принимая во внимание, что мощность лазера в наших измерениях составляет несколько десятков мВт, а амплитуда сигнала превышает 1 мВ, то чувствительность, по-видимому, может достигать 1 В/Вт. Недостатком приемника является сильный шум, одной из причин которого является использование двухконтактной схемы измерений.

Необычным фактом является высокая чувствительность приемника, несмотря на линейность вольт-амперных характеристик при всех изученных магнитных полях. На рис. 4, а представлены вольт-амперные характеристики для нескольких значений магнитного поля (B) и указаны значения сопротивления (R) приемника. На рис. 4 б приведены полевые зависимости амплитуды сигнала, свидетельствующие о практически линейном законе изменения фотосигнала с электрическим полем вплоть до напряжений 1.5 В. Такой вид зависимости отличается от обычно наблюдаемых в полупроводниковых гетероструктурах (например, в GaAs/AlGaAs), для которых характерен пороговый характер зависимости фотопроводимости от величины смещения [13]. Можно предположить, что одновременное присутствие двух типов носителей (электронов и дырок) в полуметаллических структурах приводит к таким особенностям. Для подтверждения этого предположения требуется проведение дополнительных исследований.

Таким образом, представлены доказательства того, что сигнал фотопроводимости в широких ямах HgTe/CdHgTe содержит одновременно и циклотронно-резонансную, и болометрическую компоненты, причем преобладает вклад от болометрической компоненты. В спектре фотопроводимости выделена линия циклотронного резонанса без болометрической составляющей, что имеет принципиальное значение для правильного определения эффективной массы носителей. Получены свидетельства перспективности таких структур для создания фотоприемников в терагерцовой области спектра.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и программы РАН.

Список литературы

- [1] З.Д. Квон, Е.Б. Ольшанецкий, Д.А. Козлов. Письма ЖЭТФ, **87**, 588 (2008).
- [2] Е.Б. Ольшанецкий, З.Д. Квон, М.В. Энтин, Л.И. Магарилл, Н.Н. Михайлов, И.О. Парм, С.А. Дворецкий. Письма ЖЭТФ, **89**, 338 (2009).

- [3] Д.А. Козлов, З.Д. Квон, Н.Н. Михайлов, С.А. Дворецкий. Письма ЖЭТФ, **93**, 186 (2011).
- [4] Ze-Don Kvon, S.N. Danilov, N.N. Mikhailov, S.A. Dvoretzky, W. Prettl, S.D. Ganichev. Physica E, **40**, 1885 (2008).
- [5] Yu.B. Vasilyev, F. Gouider, M. Bugar, G. Nachtwei, J. Koene-mann, C. Bruene, H. Buhmann. Phys. Status Solidi B, **247** (6), 1495 (2010).
- [6] А.В. Иконников, А.А. Ластовкин, К.Е. Спирин, М.С. Жолудев, В.В. Румянцев, К.В. Маремьянин, А.В. Антонов, В.Я. Алешкин, В.И. Гавриленко, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов, Ю.Г. Садофьев, N. Samal. Письма ЖЭТФ, **92**, 837 (2010).
- [7] F. Gouider, G. Nachtwei, C. Brüne, H. Buhmann, Yu.B. Vasilyev, M. Salman, J. Konemann, P.D. Buckle. J. Appl. Phys., **109**, 013 106 (2011).
- [8] N.N. Mikhailov, R.N. Smirnov, S.A. Dvoretzky, Yu.G. Sidorov, V.A. Shvets, E.V. Spesivtsev, S.V. Rykhliiski. Int. J. Nanotechnol., **3**, 120 (2006).
- [9] Y.B. Vasilyev, Y.L. Ivanov. Sov. Phys. Techn. Phys., **31**, 359 (1986).
- [10] N.G. Kalugin, Yu.B. Vasilyev, S.D. Suchalkin, G. Nachtwei, B.E. Sagol, K. Eberl. Phys. Rev. B, **66**, 085 308 (2002).
- [11] К.Е. Спирин, А.В. Иконников, А.А. Ластовкин, В.И. Гавриленко, С.А. Дворецкий, Н.Н. Михайлов. Письма ЖЭТФ, **92**, 65 (2010).
- [12] A. Rogalski. Rep. Prog. Phys., **68**, 2267 (2005).
- [13] Ю.Б. Васильев, С.Д. Сучалкин, Ю.Л. Иванов, С.В. Иванов, П.С. Копьев, И.Г. Савельев. Письма ЖЭТФ, **56**, 377 (1992).

Редактор Л.В. Шаронова

The mechanism of terahertz photoconductivity in semimetallic HgTe/CdHgTe quantum wells

Yu.B. Vasilyev, N.N. Mikhailov[†], F. Gouider[‡],
G.Yu. Vasilyeva^{*}, G. Hachtwei[‡]

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

[†] A.V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

[‡] Institut für Angewandte Physik,
D-38 106 Braunschweig, Germany

^{*} St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

Abstract We report the research of terahertz photoconductivity in magnetic fields in semimetallic HgTe/CdHgTe quantum wells. The main contribution to the photoconductivity is given by the signal that arises due to heating of the electron gas. Under conditions of cyclotron resonance the photoconductivity signal consists of both cyclotron resonance and bolometric components, and even in this case the bolometric contribution is dominating.