

06;07;12

Микроволновое модуляционное отражение света полупроводников

© М.А. Черников, О.А. Рябушкин

НТО "ИРЭ-Полус", Институт радиотехники и электроники РАН
(Фрязинское отделение)
E-mail: roa228@ire216.msk.su

Поступило в Редакцию 4 июля 2001 г.

Экспериментально реализован новый бесконтактный метод оптической модуляционной спектроскопии полупроводниковых структур, основанный на явлении разогрева свободных носителей заряда в полупроводнике сверхвысокочастотным полем. В однородной пленке арсенида галлия разогретые носители воздействуют на экситонные и акцепторные состояния, что приводит к изменению спектра диэлектрической проницаемости арсенида галлия вблизи края фундаментального поглощения. Изменение регистрируется по влиянию сверхвысокочастотного поля с модулированной интенсивностью на отражение света арсенидом галлия, помещенного в это поле.

Методы модуляционного отражения света [1] эффективно используются для исследования и диагностики полупроводниковых материалов и структур. Среди этих методов наибольшее распространение получило фотоотражение (ФО) [2,3]. В ФО исследуемая полупроводниковая структура освещается зондирующим светом постоянной интенсивности, с энергией квантов вблизи характерных энергетических особенностей этой структуры, и модулированным по интенсивности светом накачки, с энергией квантов, достаточной для возбуждения электронов из валентной зоны в зону проводимости. Создаваемые светом накачки неравновесные носители заряда перераспределяются встроенными электрическими полями. Перераспределение носителей заряда на частоте модуляции света накачки приводит к модуляции этих полей на той же частоте за счет возникающих внутренних фотоЭДС. Для полупроводников в спектральном диапазоне вблизи края фундаментального поглощения диэлектрическая проницаемость и коэффициент отражения света R зависят от величины встроенного электрического поля. Таким образом, модуляция интенсивности света накачки вызывает модуляцию

отражения зондирующего света ΔR . Вблизи характерных энергетических особенностей исследуемой структуры спектр ФО ($\Delta R/R$) имеет осцилляторный характер. Он может нести в себе информацию как о свободных, так и о связанных (экситонных и примесных) электронных состояниях. ФО позволяет измерять особенности зонной структуры, величины встроенных электрических полей, а также (в случае исследования низкоразмерных структур) энергии размерного квантования. Несмотря на очевидные достоинства метода ФО (бесконтактность, для измерений практически не требуется специальной подготовки образца), он обладает рядом недостатков, ограничивающих его применимость [3]. Основным недостатком является наличие сигнала фотолюминесценции (лежащего в том же спектральном диапазоне, что и сигнал ФО), связанного с рекомбинацией создаваемых светом накачки неравновесных носителей. При исследовании низкоразмерных структур, особенно при низких температурах, сигнал фотолюминесценции может на несколько порядков величины превышать сигнал ФО. Проблема их эффективного разделения остается актуальной до сегодняшнего дня.

В работе [4] был предложен и реализован метод радиочастотного модуляционного отражения (РМО) света, свободный от этого недостатка. В РМО для модуляции отражения света используется радиочастотное поле переменной амплитуды. В отличие от света накачки в методе ФО, энергии квантов радиочастотного поля недостаточно для создания новых неравновесных носителей, поэтому сигнала фотолюминесценции не возникает. Радиочастотное поле изменяет встроенные электрические поля исследуемой структуры, детектируясь на них.

В той же работе указывалось на возможность использования для модуляции коэффициента отражения света полупроводников микроволнового (СВЧ) поля. СВЧ поле, действующее на полупроводник, эффективно изменяет функцию распределения свободных носителей заряда. Такое изменение может приводить к повышению электронной и решеточной температур, изменению встроенных электрических полей, скорости ударной ионизации и степени экранировки как экситонных, так и примесных состояний. Оптический метод модуляционного отражения света открывает возможность спектрального изучения этих эффектов. Однако в силу экспериментальных особенностей такая возможность оставалась до сих пор не реализованной.

В этой статье сообщается о первой экспериментальной реализации метода микроволнового модуляционного отражения (ММО) све-

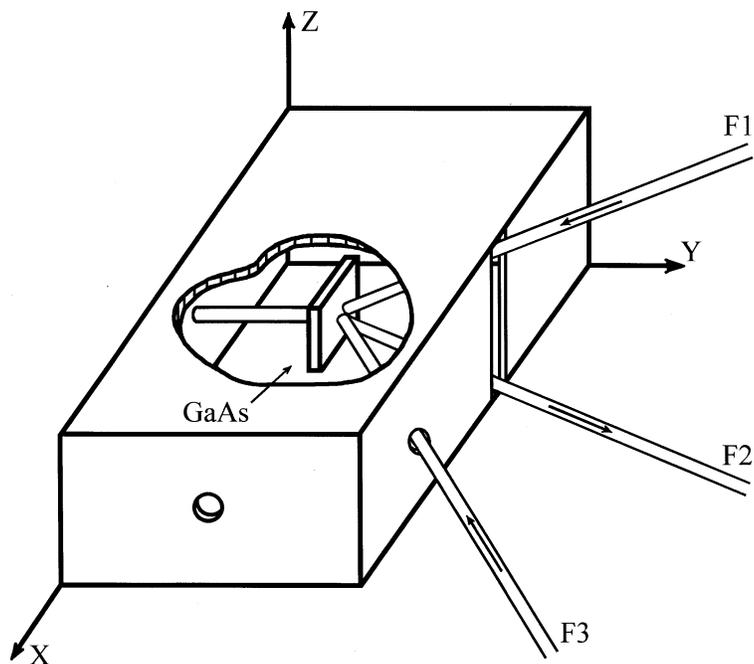


Рис. 1. Расположение образца на кварцевом стержне и оптических волокон в СВЧ резонаторе. X, Y, Z — пространственные координаты.

та. Исследовалась легированная пленка арсенида галлия толщиной $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ м, выращенной методом газофазной эпитаксии на арсенид-галлиевой полуизолирующей подложке толщиной $5 \cdot 10^{-4}$ м. Все эксперименты проводились при температуре $T = 77$ К. При этой температуре концентрация свободных носителей в пленке $n \sim 10^{21} \text{ м}^{-3}$ и их подвижность $\mu \sim 1 \text{ м}^2 \cdot \text{с}/\text{В}$. Образец GaAs, на кварцевом стержне помещался в СВЧ резонатор трехсантиметрового диапазона, в область максимума электрического поля (рис. 1). Напряженность электрической составляющей СВЧ поля в резонаторе составляла $\sim 5 \cdot 10^3 \text{ В/м}$. Плоскость образца была параллельна вектору напряженности электрического поля. Интенсивность СВЧ поля в резонаторе модулировалась с частотой $f = 330 \text{ Нз}$. Зондирующий свет от лампы накаливания пропускался

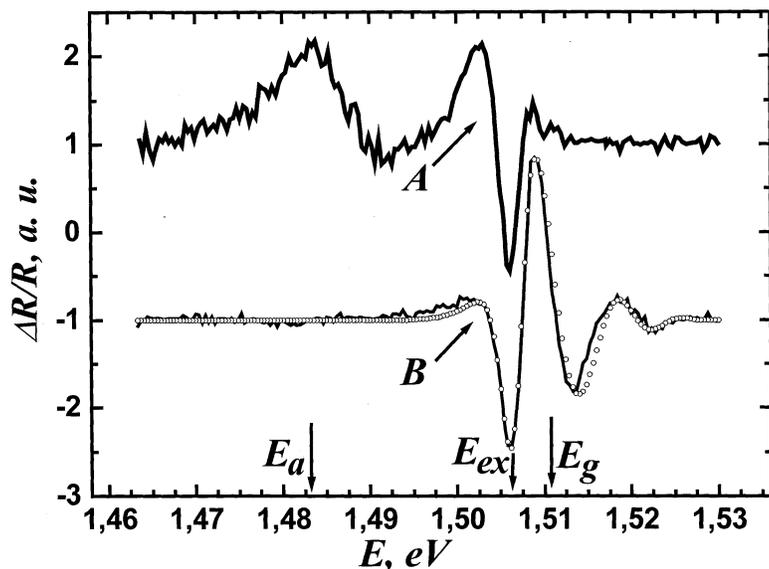


Рис. 2. Экспериментальные (сплошные линии) и модельный (кружки) спектры ММО (А) и ФО (В). Спектры приведены к одному масштабу и сдвинуты относительно нуля на +1 и -1 соответственно.

через монохроматор и подводился к образцу с помощью оптического волокна F1. Интенсивность зондирующего света на поверхности образца составляла $\sim 10 \text{ W/m}^2$. Отраженный от образца свет принимался оптическим волокном F2. Сигнал ММО измерялся методом синхронного детектирования на частоте модуляции f . Волокна были подведены к образцу через щель в узкой стенке резонатора. Такая геометрия щели вызывает минимальные искажения СВЧ поля в резонаторе. Для сравнения с ММО было проведено измерение спектров ФО. При этом модулированный по интенсивности свет накачки (частота модуляции также составляла 330 Hz) от гелий-неонового лазера (энергия квантов $E_p = 1.96 \text{ eV}$) подводился к образцу с помощью оптического волокна F3. Интенсивность света накачки на поверхности образца составляла $\sim 10^3 \text{ W/m}^2$. Все используемые оптические волокна F1, F2 и F3 — многомодовые, диаметром $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Спектр ФО (рис. 2) исследуемого образца имеет классическую структуру. При его описании использовалась модель, разработанная в работе [5]. Осцилляции Франца-Келдыша в спектре ФО, для энергий квантов зондирующего света, больших ширины запрещенной зоны арсенида галлия ($E_g = 1.511 \text{ eV}$), связаны с модуляцией светом накачки встроенного электрического поля в обедненной приповерхностной области пленки. Определенная по модельному спектру величина этого поля составляет $3 \cdot 10^5 \text{ V/m}$.

Разогрев носителей заряда в полупроводниках СВЧ полем нарушает термодинамическое равновесие между диффузионными и дрейфовыми токами, что приводит к возникновению встроенных термоЭДС горячих электронов [6]. Наиболее ярко это явление проявляется в гетероструктурах [7]. Разогрев носителей заряда может также осуществляться пропусканием электрического тока через контакты в полупроводнике. На таком способе разогрева основан метод отражения света, модулированного током [8]. В отличие от него, метод ММО полностью бесконтактен. Отсутствие Франц-Келдышевских осцилляций на спектре ММО (рис. 2) указывает на то, что СВЧ поле продольной конфигурации не изменяет встроенное поперечное электрическое поле в обедненной области исследуемого образца. Это говорит о малости возникающей под действием СВЧ поля термоЭДС горячих электронов, что естественно для однородной пленки.

В спектрах ФО арсенида галлия могут проявляться акцепторные состояния [9,10], но нам не удалось пронаблюдать их этим методом. Однако на спектре ММО мы наблюдали особенность ($E_a = 1.483 \text{ eV}$), лежащую в области энергий переходов электронов с акцепторных состояний в зону проводимости. Механизмы модуляции акцепторных состояний в методах ФО и ММО могут различаться. Исследуемая пленка *n*-типа — компенсированная, и в отсутствие внешних возмущений все акцепторы в ней отрицательно заряжены. Электроны зоны проводимости, разогреваясь СВЧ полем, изменяют флуктуационный потенциал, создаваемый заряженными примесями. Это приводит к изменению вероятности возбуждения электронов с акцепторов в зону проводимости зондирующим светом, то есть коэффициентов поглощения и отражения этого света.

Экситонные состояния ($E_{ex} = 1.507 \text{ eV}$), чувствительные к разнообразным внешним воздействиям [11], проявляются на обоих спектрах. Модуляция экситонов в методе ММО может быть обусловлена изменением скорости их ударного возбуждения электронами проводимости,

разогретыми СВЧ полем. На спектре ФО особенность, связанная с экситонами, спектрально перекрывается с проявлением эффекта Франца-Келдыша в обедненной области пленки. Метод ММО, в свою очередь, позволил выделить экситонный отклик в более чистом виде.

Пленка арсенида галлия была выбрана в качестве объекта исследований из соображений сравнительной простоты интерпретации экспериментальных спектров. Однако возможности метода ММО не ограничены исследованием однородных полупроводниковых пленок. Нами, в частности, получены спектры ММО от гетероструктур, используемых для создания транзисторов с высокой подвижностью электронов. Результаты этих исследований будут опубликованы после проведения их количественного анализа.

Авторы благодарят А.В. Францессона (ИРЭ ФО РАН) за обсуждение постановочной части эксперимента и В.П. Гапонцева (НТО "ИРЭ-Полус") за поддержку на всех этапах работы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 00-02-16655).

Список литературы

- [1] Кардона М. Модуляционная спектроскопия. М: Мир, 1972. 416 с.
- [2] Nahory R.E., Shay J.L. // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 21. N 23. P. 1569–1571.
- [3] Glembocki O.J., Shanabrook B.V. // Semiconductors and Semimetals. 1992. V. 36. P. 221–292.
- [4] Рябушкин О.А., Сабликов В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. В. 3. С. 217–221.
- [5] Estreza J.P., Duncan W.M., Glosser R. // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. N 11. P. 7281–7294.
- [6] Денис В.И., Пожела Ю.К. Горячие электроны. Вильнюс: Минтис, 1971. 289 с.
- [7] Gribnikov Z.S., Hess K., Kosinovsky G.A. // J. Appl. Phys. 1995. V. 77. N 6. P. 1337–1373.
- [8] Ryabushkin O.A., Lonskaya E.I. // Proc. of 10th Int. Conf. on "Modulated Semiconductor Structures", Linz, 2001.
- [9] Pikhtin A.N., Airaksinen V.-M., Lipsanen H. et al. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. N 6. P. 2556–2557.
- [10] Пихтин А.Н., Тодоров М.Т. // ФТП. 1994. Т. 28. В. 6. С. 1068–1075.
- [11] Tanguy C. // J. Appl. Phys. 1996. V. 80. N 8. P. 4626–4631.