ВРЕМЕННЫЕ ФОРМЫ ТЕРАГЕРЦЕВЫХ ИМПУЛЬСОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕТОДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР СО МНОЖЕСТВЕННЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ $In_xGa_{1-x}N/GaN$

Е.Р. Бурмистров, Л.П. Авакянц
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы 1, Москва 119991, Россия,
eugeni.conovaloff@yandex.ru; avakyants@physics.msu.ru

Методом терагерцевой спектроскопии с временны́м разрешением (THz–TDs) зарегистрированы временны́е формы электрического поля терагерцевых импульсов, возбуждаемых в гетероструктурах со множественными квантовыми ямами $In_xGa_{1-x}N/GaN$ лазерными импульсами длительностью 130фс в диапазоне температур от 90 до 170 К. Быстрое преобразование Фурье временных форм терагерцевых импульсов позволило получить частотные спектры мощности и фазового сдвига терагерцевого излучения, интерпретация которых дала возможность оценить время релаксации квазиимпульса, подвижность и эффективную массу основных носителей заряда в гетероструктурах с тремя и пятью квантовыми ямами $In_xGa_{1-x}N/GaN$. Значение подвижности, полученное методом THz–TDs, хорошо согласуется с данными холловских измерений.

Ключевые слова: гетероструктуры; квантовые ямы; двумерный электронный газ; терагерцевые частоты; фемтосекундные импульсы; резонанс; красное смещение.

TEMPORAL FORMS OF TERAHERTZ PULSES GENERATED USING LED'S HETEROSTRUCTURES WITH $In_xGa_{1-x}N/GaN$ MULTIPLE QUANTUM WELLS

Evgeny R. Burmistrov, Lev P. Avakyants
Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia,
eugeni.conovaloff@yandex.ru; avakyants@physics.msu.ru

In this paper, heterostructures with $In_xGa_{1-x}N/GaN$ multiple quantum wells (MQWs) are used as sources of terahertz radiation. To generate terahertz pulses, radiation from a Ti: sapphire laser with an average output power of 57 mW, with a pulse duration of 130 fs and at a wavelength of 800 nm is used. Using the method of terahertz time–domain spectroscopy (THz-TDs), we register the temporal forms of the electric field of terahertz pulses in the temperature range from 90 to 170 K. The terahertz electromagnetic radiation arises as a result of multiphoton absorption of femtosecond laser pulses in the active region of heterostructures. The fast Fourier transform of temporal forms of terahertz pulses made it possible to obtain frequency spectra of the power and phase shift of terahertz radiation, the interpretation of which made it possible to estimate the relaxation time of the quasi-pulse, mobility and effective mass of the majority charge carriers in the heterostructures under study. Using a series of frequency power spectra and phase shift of terahertz radiation, temperature dependences of the effective mass and relaxation time of a two-dimensional electron gas (2DEG) were obtained. The 2DEG mobility obtained using the THz–TDs is consistent with that from Hall measurements. In the temperature range from 90 to 170 K, terahertz radiation demonstrates an oscillatory character with characteristic resonant frequencies. An increase in the sample temperature leads to a red shift of the resonant frequency, which is followed by a temperature renormalization of the effective mass of the majority charge carriers on a rather large scale by about 1.5 times.

Keywords: heterostructures; quantum wells; two-dimensional electron gas; terahertz frequencies; femtosecond pulses; resonance; red shift.

Введение

Метод терагерцевой спектроскопии с временны́м разрешением (THz–TDs) основан на генерации терагерцевых импульсов и детектировании их временны́х форм световыми импульсами фемтосекундной длительности.

В данной работе в качестве источников

терагерцевого излучения используются гетероструктуры InGaN/AlGaN/GaN со встроенными пьезоэлектрическими полями [1]. Гетероструктуры со МКЯ $In_xGa_{1-x}N/GaN$ преобразуют фемтосекундные оптические импульсы в терагерцевые электромагнитные волны [2].

Исследования проводящих свойств гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN являются актуальными в связи с их широким практическим использованием в приборах микро- и оптоэлектроники [3]. Однако выходная мощность и эффективность излучения устройств на основе гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN определяются подвижностью двумерного электронного газа (2DEG) во МКЯ $In_xGa_{1-x}N/GaN$.

Целью данной работы является определение методом THz–TDs времени релаксации квазиимпульса, подвижности и эффективной массы основных носителей заряда в гетероструктурах со МКЯ $In_xGa_{1-x}N/GaN$.

Экспериментальные образцы

Объектом исследования является типичная для светодиодных гетероструктур с тремя и пятью КЯ $In_xGa_{1-x}N/GaN$ в активной области слоевая структура (рис. 1). Исследовались промышленные образцы гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN, выращенные методом газофазной эпитаксии (ГФЭ).

Для гетероструктур InGaN/AlGaN/GaN на подложке Al_2O_3 толщиной 430 мкм в направлении [0001] первым наращивался затравочный низкотемпературный слой GaN толщиной 5 мкм, предназначенный для уменьшения рассогласования постоянных кристаллических решеток между формируемыми слоями. Для улучшения структурного качества полупроводника и снижения плотности дислокаций в слоях гетероструктуры формировалась буферная сглаживающая сверхрешётка InGaN/GaN (20 периодов квантовая яма/квантовый барьер (КЯ/КБ) с толщинами 2/2 нм).

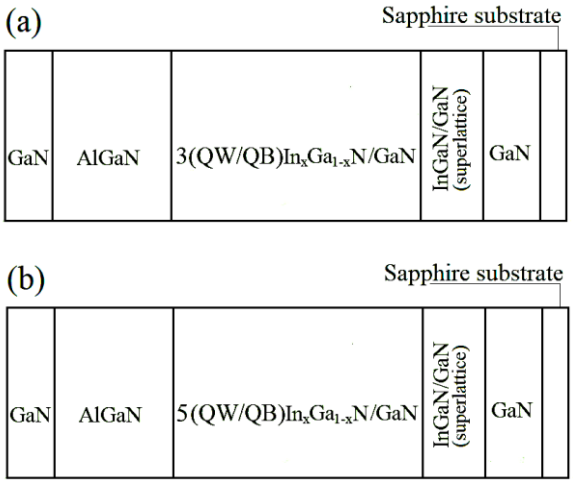

Рис. 1. Слоевая структура образцов с тремя и пятью КЯ $In_xGa_{1-x}N/GaN$ в активной области

Активная область гетероструктур состоит из трех и пяти квантовых ям/квантовых барьеров (КЯ/КБ) $In_xGa_{1-x}N/GaN$ с толщинами 2.5/15 нм и 3/12 нм. Последними формировались слои AlGaN толщиной 20 нм и GaN толщиной 110 нм.

Методика генерации терагерцевых импульсов и детектирования их временных форм

Регистрация временных форм электрического поля терагерцевых импульсов проводились на установке, схема которой приведена на рис. 2.

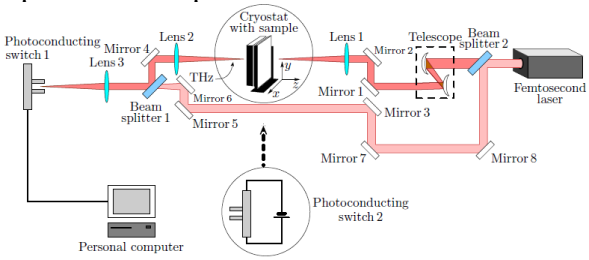

Рис. 2. Схема экспериментальной установки для генерации терагерцевых импульсов и детектирования их временных форм

В схеме (рис. 2) источником излучения является Ti: сапфировый лазер с временным окном импульсов 130фс на длине волны 800 нм (ИК-излучение) со средней выходной мощностью 57 мВт и с частотой следования импульсов 60МГц.

Излучение Ti:сапфирового лазера диаметром пучка 1.8 мм с помощью делителя

пучка разделялось на пучок накачки и пробный пучок (референс) (рис. 2). Пучок накачки использовался в канале генерации терагерцевых импульсов. Референс использовался в когерентной схеме детектирования для управления детектором.

Поскольку Ti: сапфировый лазер настроен на длину волны 800 нм, используемый квант света имеет энергию 1.55 эВ. В исследованных гетероструктурах ширина запрещенной зоны в области КЯ InGaN равна 2.6 эВ. Следовательно, в результате двухфотонного поглощения фемтосекундных лазерных импульсов в КЯ InGaN возникают пространственно разделенные электроны и «дырки». Под действием встроенного пьезоэлектрического поля электрон-дырочная пара становится поляризованной. Это ведет к генерации переменного во времени дипольного момента в системе, который, в свою очередь, приводит к излучению терагерцевых электромагнитных волн.

В настоящей работе регистрировались две временны́е формы электрического поля терагерцевых импульсов $E_{on}(t)$ и $E_{off}(t)$. Временные формы $E_{on}(t)$ детектировались с помощью референса, время прихода которого регулировалось оптической системой задержки (рис. 2). Для регистрации временной зависимости $E_{off}(t)$ использовались две фотопроводящие антенны. Одна из них (ФП1) применялась в качестве детектора терагерцевых импульсов. Другая (ФП2) использовалась вместо криостата с образцами для преобразования подаваемых на нее фемтосекундных импульсов в терагерцевые (рис. 2). Обработка терагерцевых спектров эмиссии проводилась с помощью персонального компьютера.

Экспериментальные результаты

На рис. 3a, c представлены временные формы электрического поля терагерцевых импульсов, полученные для двух типов образцов гетероструктур при температуре 90К.

Временная форма терагерцевых импульсов $E_{on}(t)$ представляет собой максимум с положительными и отрицательными полуволнами. Максимум временной зависимости $E_{on}(t)$ соответствует дипольному отклику 2DEG как ответ на многофотонное возбуждение оптическими импульсами фемтосекундной длительности. Наложение многократных отражений терагерцевого импульса от границ раздела КБ/КЯ проявилось на рис. 3a, c в виде положительных полуволн.

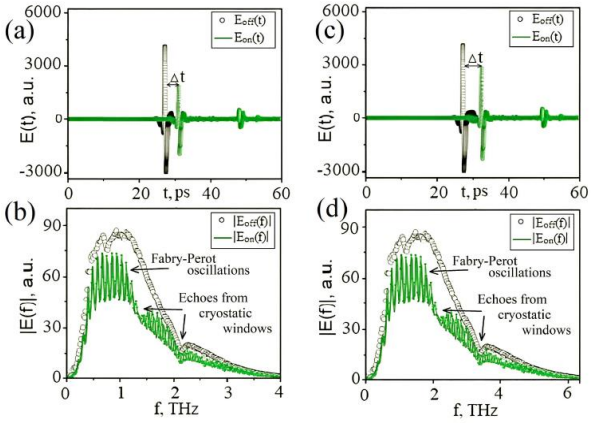

Рис. 3. Временные формы электрического поля терагерцевых импульсов для гетероструктур с тремя (a) и пятью (c) КЯ $In_xGa_{1-x}N/GaN$. Результат обработки соответствующих временных форм методом быстрого Фурье преобразования (b, d)

На рис. 3a, c задержка Δt терагерцевого импульса с временной формой $E_{on}(t)$ относительно терагерцевого импульса с временной формой $E_{off}(t)$ является временем релаксации квазиимпульса 2DEG, которое равно 2.3 пс (рис. 3a) и 3.4 пс (рис. 3c).

Библиографические ссылки

1. Prudaev I., Sarkisov S., Tolbanov O. and Kosobutsky A. Photoluminescence and terahertz generation in InGaN/GaN multiple quantum well light-emitting diode heterostructures under laser excitation. *Phys. Stat. Sol. B* 2015; 252 (5).
2. S. van Capel P.J., Turchinovich D., Porte H.P. et al. Correlated terahertz acoustic and electromagnetic emission in dynamically screened InGaN/GaN quantum wells. *Phys. Rev. B* 2011; 84 (085317).
3. Sun G., Xu G., and Ding Y. Generation of terahertz radiation in LED heterostructures with multiple InGaN/GaN quantum wells. *IEEE J. Sel. Top.Quantum Electron* 2011; 17 (48).