

УДК 621.383; 621.315.5

Генерация второй оптической гармоники в гетероэпитаксиальных структурах теллурида кадмия—ртути

И. Д. Бурлаков, А. С. Кашуба, А. В. Демин, С. В. Заботнов

Экспериментально исследована генерация второй оптической гармоники (ГВГ) в гетероэпитаксиальных структурах теллурида кадмия—ртути (КРТ), выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs. Измерены зависимости интенсивности сигнала ГВГ от направления поляризации излучения накачки и позиции лазерного луча на исследуемых образцах как для монокристаллического слоя КРТ, так и для нанесенного на него функционального поликристаллического слоя CdTe. В первом случае сигнал строго детерминирован монокристаллическостью и кристаллографической ориентацией слоя КРТ, а во втором — меняется от точки к точке из-за неоднородности структуры поликристаллического слоя CdTe.

PACS: 41.20.-q, 85.60.-q

Ключевые слова: генерация второй оптической гармоники, теллурид кадмия—ртути (КРТ), гетероэпитаксиальные структуры.

Введение

Тройное полупроводниковое соединение теллуридов кадмия—ртути (КРТ, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) является одним из важнейших материалов фотоэлектроники. Особенно велика его роль в создании фотоприемников, работающих в инфракрасной области спектра, в том числе матричных [1—3]. Из-за значительных технологических сложностей получения качественных монокристаллов и эпитаксиальных структур свойства материала КРТ, относящегося к соединениям A^2B^6 , изучены гораздо хуже, чем свойства элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений типа A^3B^5 .

Методы эпитаксиального выращивания КРТ позволяют создавать необходимые для достижения высоких характеристик фоточувствительности многослойные структуры со сложными профилями легирования и состава [2]. Большой инте-

рес представляют гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС), выращиваемые методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) как на согласованной по постоянной кристаллической решетки подложке кадмий—цинк—теллур (КЦТ), так и на альтернативных КЦТ-подложках кремния [3], германия [4] и арсенида галлия [5].

Свойства выращенного слоя КРТ определяются многими факторами такими, как тип и качество подготовки подложки, состав буферных слоев, условия роста и т. п. Одним из ключевых моментов в технологии синтеза ГЭС КРТ МЛЭ является постановка методов контроля их параметров. Особый интерес представляют оптические методы, поскольку они являются неразрушающими и могут применяться для экспресс-анализа структурных свойств полупроводникового слоя как непосредственно в процессе роста (*in-situ*), так и после выращивания (*ex-situ*). Получаемые данные позволяют оптимизировать условия эпитаксиального наращивания слоев. Одним из наиболее удачных методов неразрушающего оптического контроля структурных свойств поверхности является метод ГВГ, чувствительный как к изменениям на границе раздела различных сред [6, 7], так и к фазово-структурным свойствам приповерхностного слоя [8, 9].

Таким образом, исследование ГВГ представляет интерес как в эпитаксиальном слое КРТ, так и в функциональных слоях, образующих структуру фоточувствительных элементов на его основе.

Эксперимент

В настоящей работе экспериментально измерялся сигнал ГВГ в ГЭС КРТ, выращенной мето-

Бурлаков Игорь Дмитриевич, начальник НИЦ.
Кашуба Алексей Сергеевич, ведущий инженер-технолог.
ГНЦ РФ ФГУП «НПО "Орион"».
Россия, 111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/2.
Тел. (499) 374-48-85. E-mail: idbur@orion-ir.ru
Демин Андрей Васильевич, ведущий научный сотрудник.
ФГУП "ВНИИОФИ".
Россия, 119361, Москва, ул. Озерная, 46.
Тел. (495) 781-45-74. E-mail: demin@vniiofi.ru
Заботнов Станислав Васильевич, научный сотрудник.
МГУ им. М. В. Ломоносова (физический факультет).
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.
Тел. (495) 939-15-66. E-mail: zabortnov@vega.phys.msu.ru

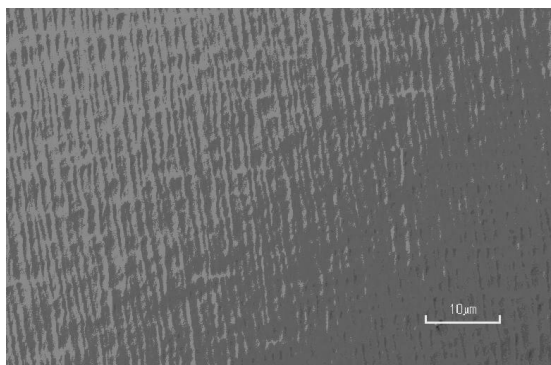
Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

дом МЛЭ на подложке GaAs с ориентацией поверхности (310), и в такой же гетероструктуре с нанесенным на поверхность КРТ слоем CdTe. Параметры исследуемых образцов отражены в таблице.

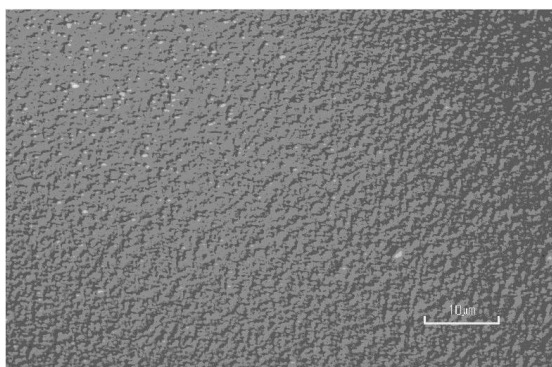
Исследуемые образцы

Образец № 1	ГЭС КРТ МЛЭ на подложке GaAs (310) с монокристаллическим слоем $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ состава $x \sim 0,2$ толщиной 7,3 мкм
Образец № 2	ГЭС КРТ МЛЭ на подложке GaAs (310) с монокристаллическим слоем $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ и нанесенным на него слоем CdTe толщиной 0,75 мкм

При изготовлении фотоприемных матриц слой CdTe играет роль пассивирующего диэлектрика [6]. Нанесение слоя осуществляется эпитаксиальным выращиванием методом "горячей стенки" при температуре источника 495 °С, обеспечивающим хорошую адгезию и необходимые свойства границы раздела КРТ-CdTe. При таком методе слой CdTe получается поликристаллическим и с высоким удельным сопротивлением. Изображения поверхности исследованных образцов, полученные в режиме дифференциально-интерференционного контраста Номарского на автоматизированном микроскопе Nikon LV150, показаны на рис. 1.



а



б

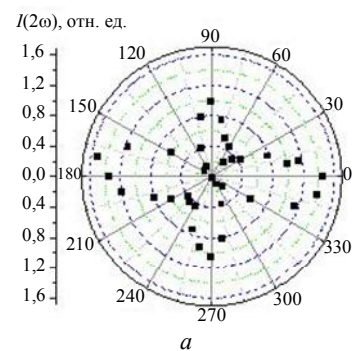
Рис. 1. Изображения поверхности образца № 1 (а) и образца № 2 (б) в режиме дифференциально-интерференционного контраста Номарского

Поверхность образца № 1 имеет характерный для получаемых МЛЭ монокристаллических слоев КРТ периодический рельеф, обусловленный ступенями роста (рис. 1, а), а поверхность образца

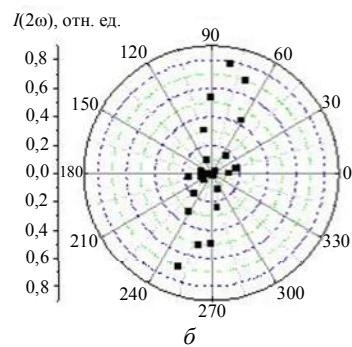
№ 2 имеет неоднородности в виде монокристаллитов теллурида кадмия (рис. 1, б).

Вторая гармоника генерировалась в геометрии на отражение падающего под углом 45° к поверхности образца излучения Nd:YAG-лазера ($\lambda = 1064$ нм, длительность импульсов 34 пс, интенсивность $\sim 10^{10}$ Вт/см²). Направление поляризации линейно-поляризованного излучения накачки плавно изменялось с помощью полуволновой пластины, одновременно с которой вращался анализатор, пропускающий излучение второй гармоники с поляризацией, сонаправленной с поляризацией накачки или перпендикулярно ей.

На рис. 2 представлены ориентационные зависимости интенсивности второй гармоники от угла между направлением поляризации накачки и выделенным кристаллографическим направлением на образце № 1. Обе представленные зависимости имеют симметричную форму. В случае анализатора, сонаправленного с направлением поляризации накачки, зависимость имеет четыре максимума, расположенных под углом 90° (рис. 2, а), а в случае скрещенного — два, расположенных друг напротив друга (рис. 2, б). Форма ориентационных зависимостей строго детерминирована тензором нелинейной восприимчивости $\chi^{(2)}$ для процесса ГВГ [7], при этом изменения формы и интенсивности в ориентационных зависимостях в различных точках образца зарегистрировано не было. Полученные результаты свидетельствуют о монокристалличности приповерхностной области слоя КРТ в ГЭС образца № 1.



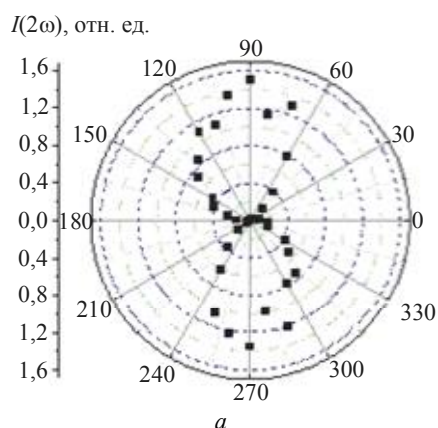
а



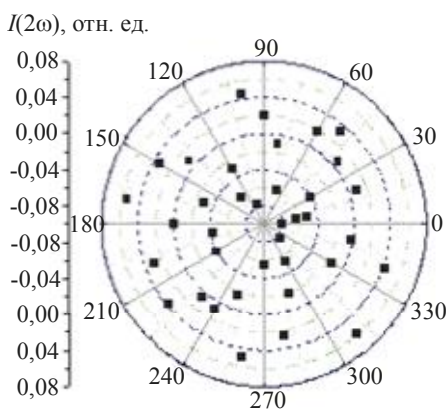
б

Рис. 2. Ориентационные зависимости интенсивности второй оптической гармоники для образца № 1 при параллельном (а) и скрещенном (б) анализаторе относительно направления поляризации луча накачки

Ориентационные зависимости интенсивности ГВГ в образце № 2 имеют существенно иной характер (рис. 3). В случае анализатора, сонаправленного с направлением поляризации накачки, зависимость имеет два симметричных максимума (рис. 3, а), в случае скрещенного — нулевой (на уровне шума) сигнал (рис. 3, б). Такое поведение свидетельствует о том, что ГВГ происходит не в монокристаллической структуре слоя HgCdTe, а в слое CdTe, не обладающим свойствами монокристалла. Следовательно, слой CdTe на поверхности является плотно упакованным и разупорядоченным, что согласуется с данными оптической и электронной микроскопии, показывающими поликристалличность слоя CdTe.



а



б

Рис. 3. Ориентационные зависимости интенсивности второй оптической гармоники для образца № 2 при параллельном (а) и скрещенном (б) анализаторе относительно направления поляризации луча накачки

Следует также отметить, что в различных точках образца № 2 форма ориентационных зависимостей не менялась, однако интенсивность сигнала была различной. По поверхности данного образца было проведено сканирование эффективности ГВГ при параллельном расположении анализатора относительно направления поляризации накачки в конфигурации, в которой сигнал максимален (90° на рис. 3, а). На рис. 4 представлены результаты данного сканирования с шагом 0,2 мм, который выбирался из расчета, что радиус сфоку-

сированного на образец пучка накачки составлял 0,1 мм, и сканирование с меньшим шагом не несло дополнительной информации о неоднородности поверхности. Как можно видеть из рис. 4, интенсивность сигнала второй гармоники на образце № 2 существенно (более чем в 2 раза) меняется от точки к точке. Данное поведение свидетельствует о структурной неоднородности и разупорядоченности поликристаллического слоя CdTe, что также согласуется с данными оптической и электронной микроскопии.

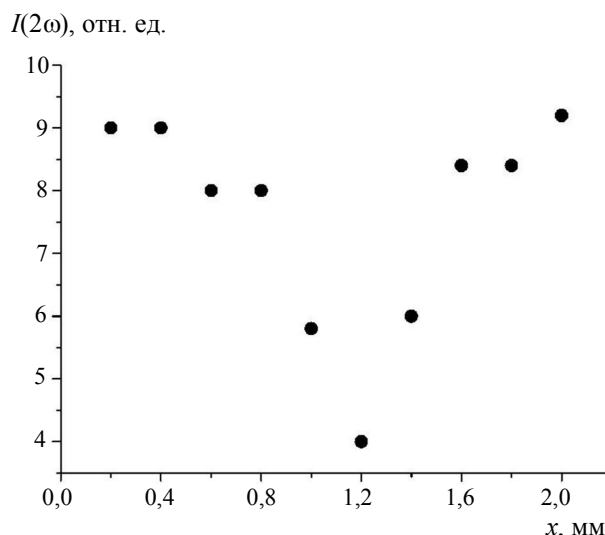


Рис. 4. Зависимость интенсивности сигнала второй гармоники от положения лазерного луча накачки на образце № 2

Обсуждение результатов

Обнаруженная неоднородность интенсивности сигнала второй оптической гармоники из поверхности образца № 2 объясняется хаотической ориентацией и неоднородностью размеров и концентрации микрокристаллитов в пленке CdTe, приводящей к флуктуациям нелинейной восприимчивости и оптического отклика в поликристаллическом слое. Действительно, интенсивность сигнала второй оптической гармоники $I(2\omega)$ из приповерхностного слоя будет определяться выражением [8]: $I(2\omega) \propto [\chi^{(2)}]^2 I^2(\omega)$, где $\chi^{(2)}$ — тензор нелинейной восприимчивости для процесса ГВГ, $I(\omega)$ — интенсивность излучения накачки внутри поликристаллического слоя CdTe. Структура тензора $\chi^{(2)}$ определяет, в первую очередь, форму ориентационной зависимости. В случае разупорядоченных микрокристаллитов CdTe интегральный сигнал по апертуре пучка накачки будет изотропным независимо от кристаллографической ориентации микрокристаллита, что подтверждается экспериментальными данными, представленными на рис. 3. В то же время интенсивность сигнала второй оптической гармоники будет определяться

величиной $I(\omega)$, которая внутри неоднородного поликристаллического слоя CdTe будет меняться от точки к точке из-за вариации локальных полей $E_{loc}(\omega)$ в микрокристаллитах различных размеров и формы [9], расположенных неоднородным образом в различных точках на поверхности образца. Поскольку $I(\omega) \propto E_{loc}^2(\omega)$, то $I(2\omega) \propto [\chi^{(2)}]^2 E_{loc}^4(\omega)$, т. е. эффективность процесса ГВГ будет определяться четвертой степенью распределения локальных электромагнитных полей в поверхностном поликристаллическом слое CdTe. Иными словами, методом ГВГ можно характеризовать степень неоднородности распределения наночастиц CdTe на поверхности с заданной точностью. Точность может быть повышена за счет более жесткой фокусировки излучения накачки на образец.

Заключение

Впервые методом ГВГ проведено экспериментальное исследование гетероэпитаксиальных структур HgCdTe/GaAs. Экспериментально измерена интенсивность ГВГ в ГЭС КРТ МЛЭ как на чистой поверхности, так и с нанесенным функциональным поликристаллическим слоем CdTe. Показано, что процесс ГВГ в данных структурах существенно различается. Если в первом случае сигнал ГВГ строго детерминирован монокристаллическостью и кристаллографической ориентацией

слоя КРТ, то во втором — меняется от точки к точке из-за неоднородности структурных и нелинейных оптических свойств слоя CdTe. Полученные результаты могут быть использованы при разработке методов диагностики поверхности эпитаксиальных слоев как КРТ, так и других функциональных полупроводниковых слоев в технологическом процессе получения фоточувствительных матричных структур на основе ГЭС КРТ МЛЭ. Однако для более полного обоснования и детализации применения такого метода необходимы дополнительные экспериментальные и теоретические исследования.

Литература

1. Пономаренко В. П. // УФН. 2003. Т. 173. № 6. С. 649—665.
2. Kinch M. A. *Fundamentals of Infrared Materials*. — Washington: SPIE Press, 2007.
3. Якушев М. В., Брунев Д. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А. и др. // Автометрия. 2009. Т. 45. № 4. С. 23—31.
4. Vilela M. F., Lofgreen D. D., Smith E. P. G., Newton M. D. et al. // *J. Electronic Materials*. 2008. V. 37. No. 9. P. 1465—1470.
5. Varavin V. S., Vasiliev V. V., Dvoretzky S. A., Michalov N. N. et al. // *Opto-Electron. Rev.* 2003. V. 11. No. 3. P. 99—111.
6. Головин С. В., Бураков И. Д. // Пат. 2298251 РФ от 13.10.2005
7. Сиротин Ю. И., Шаскольская М. П. *Основы кристаллофизики*. — М.: Наука, 1975.
8. Шен И. П. *Принципы нелинейной оптики*. — М.: Наука, 1989.
9. Куттель Ч. *Введение в физику твердого тела*. — М.: Наука, 1978.

Second optical harmonic generation in the cadmium mercury telluride heteroepitaxial structures

I. D. Burlakov, A. S. Kashuba

Orion Research and Production Association, 46/2 Enthusiast highway, Moscow, 111123, Russia
E-mail: idbur@orion-ir.ru

A. V. Demin

All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements,
46 Ozernay str., Moscow, 119361, Russia
E-mail: demin@vniiofi.ru

S. V. Zobotnov

Lomonosov Moscow State University, 1/2 Leniniskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: zobotnov@vega.phys.msy.ru

Second optical harmonic generation (SHG) in mercury cadmium telluride (MCT), heteroepitaxial structures grown up by molecular beam epitaxy on GaAs substrate is experimentally investigated. Dependences of SHG signal on a direction of pumping radiation and polarization and a position of a laser beam on investigated samples both for monocrystal MCT layer and for functional polycrystalline CdTe layer put on it are measured. In the first case the signal is strictly determined by crystallinity and crystallographic orientation of MCT layer and in the second case varies from a point to a point because of CdTe layer polycrystalline structure heterogeneity.

PACS: 41.20.-q, 85.60.-q

Keywords: second optical harmonic generation, mercury cadmium telluride (MCT), heteroepitaxial structure.

Bibliography — 9 references.

Received November 22, 2010