

УДК 546.4: 548.25

## Исследование влияния подготовки поверхности подложек GaAs на свойства MOCVD-эпитаксиальных слоев CdTe и CdHgTe

А. П. Котков, А. Н. Моисеев, Н. Д. Гришнова, А. В. Чилисов

*Исследовано влияние предростовой подготовки подложек GaAs на кристаллическое совершенство и морфологию поверхности выращенных на них MOCVD-слоев CdTe и Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te. Показано, что оптимальной температурой отжига подложек GaAs(100) в атмосфере водорода является 580—590 °С, а подложек GaAs(111)В — 530—550 °С. При более высокой температуре отжига ухудшается морфология поверхности выращиваемых слоев CdTe, а при более низкой — ухудшается их кристаллическое совершенство. Нанесение гомоэпитаксиального слоя арсенида галлия на подложки GaAs(100) может служить эффективным средством уменьшения плотности ростовых дефектов (hillocks) на поверхности гетерослоев Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te(100)/CdTe(100)/GaAs(100).*

PACS: 73.61.Ga; 81.15.Gh

*Ключевые слова:* подложка, морфология, поверхность, температура, гетерослой.

### Введение

Монокристаллические пластины теллурида кадмия и CdZnTe большой площади сложны в изготовлении, имеют высокую стоимость и низкую механическую прочность. Поэтому для выращивания эпитаксиальных слоев CdHgTe (КРТ) большой интерес представляют подложки из других более дешевых и распространенных материалов.

Наиболее широко для осаждения слоев КРТ методами химического осаждения из паровой фазы (MOCVD) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) используются подложки из GaAs, так как при высоком качестве и большой площади они имеют умеренную стоимость.

Из-за большого несоответствия решеток между GaAs и Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te (~ 14 % для  $x = 0,2$ ) на поверхности подложки GaAs предварительно выращивается буферный слой теллурида кадмия, а затем — слой Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te нужного состава (расогласование параметров решетки CdTe и Cd<sub>0,2</sub>Hg<sub>0,8</sub>Te составляет ~ 0,3 %).

Особенностью выращивания CdTe непосредственно на GaAs является то, что на GaAs(100) в зависимости от условий осаждения могут расти как слои с ориентацией (100), так и с ориентацией (111)В [1—4]. На подложках GaAs(111) растут только

слои CdTe(111). Слои КРТ воспроизводят кристаллографическую ориентацию буферного слоя CdTe, а качество их во многом определяется морфологией поверхности и кристаллическим совершенством буферного слоя, поэтому важно оптимизировать условия роста последних.

Для слоев CdTe (100) на подложках GaAs характерны фигуры роста — холмики (hillocks) размером до нескольких десятков микрон с поверхностной концентрацией  $10^3$ – $10^4$  см<sup>-2</sup>, которые ухудшают морфологию поверхности и затрудняют их дальнейшее использование. Слои CdTe(111)В на подложках GaAs имеют более гладкую поверхность, поэтому используются чаще.

Необходимой стадией, которая предшествует нанесению буферного слоя CdTe на подложку из GaAs, обычно является удаление поверхностного окисленного слоя. Для этого проводится отжиг подложки в потоке водорода при температуре 550—600 °С в течение 10—20 мин [5]. Из литературных данных известно, что удаление окисного слоя является необходимым условием получения монокристаллических слоев CdTe на подложках GaAs. С другой стороны, отжиг может приводить к укрупнению (растравливанию) дефектов, уже имеющихся на подложке, к изменению состава поверхности GaAs из-за преимущественного испарения мышьяка, к перестройке структуры поверхности GaAs(100), которая в совокупности с условиями начальных стадий роста теллурида кадмия может приводить к зарождению либо слоя CdTe (100), либо CdTe(111)В.

Важной проблемой гетероэпитаксии Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te на подложках GaAs(100)/CdTe(100) является образование многочисленных ростовых фигур (hillocks), ухудшающих целевые свойства слоев.

Котков Анатолий Павлович, ст. научный сотрудник.  
Моисеев Александр Николаевич, зам. директора.  
Гришнова Наталья Дмитриевна, ст. научный сотрудник.  
Чилисов Алексей Викторович, научный сотрудник.  
Институт химии высокочистых веществ РАН.  
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Тропинина, 49.  
Тел. (831) 462-76-12. Факс (831) 462-57-64.  
E-mail: grichnova@bk.ru

Статья поступила в редакцию 8 октября 2009 г.

Образование ростовых фигур также может быть обусловлено изменением поверхности подложки при отжиге.

Цель работы — исследование влияния подготовки поверхности подложек GaAs на свойства эпитаксиальных слоев CdTe. Изучалось влияние предростового отжига подложек GaAs, а также предварительного осаждения гомоэпитаксиального слоя арсенида галлия на кристаллическое совершенство и морфологию поверхности выращенных на них слоев CdTe и  $Cd_xHg_{1-x}Te$ .

### Экспериментальная часть

Осаждение слоев CdTe проводили в вертикальном кварцевом реакторе из паров диэтилтеллура (ДЭТ) и диметилкадмия (ДМК) при температуре подложки 350—360 °С и общем давлении (газ-носитель водород) 20 кПа [6]. Использовали пластины полуизолирующего GaAs кристаллографической ориентации (100) с отклонением  $\sim 3^\circ$  в направлении [110], а также ориентации (111)В с отклонением  $\sim 3^\circ$  в направлении [211].

Структурное совершенство эпитаксиальных слоев оценивали по полуширине кривой качания рентгеновской дифракции (FWHM — Full Width at Half Maximum). Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре ДРОН-4М. Толщину слоев определяли весовым методом, а также по интерференции из спектров ИК-пропускания на Фурье-спектрометре IFS-113v. Погрешность определения не превышала 5 %. Исследование морфологии поверхности слоев проводили с помощью оптического микроскопа Axioplan 2 (Carl Zeiss) и на растровом электронном микроскопе SEM-515.

### Результаты и их обсуждение

Для оптимизации условий отжига авторами было проведено исследование влияния температуры отжига подложек GaAs на кристаллическое совершенство и морфологию выращиваемых на них слоев CdTe и КРТ. Отжиг подложек GaAs проводили в потоке водорода при атмосферном давлении, последующее осаждение буферных слоев CdTe осуществляли при температуре подложки 350 °С.

Полученные с помощью оптического микроскопа данные (табл. 1) свидетельствуют о существенном ухудшении морфологии поверхности слоев CdTe, выращенных на подложках GaAs как (111)В, так и (100) ориентации, отожженных в течение 15 мин при температуре выше 600 °С. Снижение температуры отжига подложек GaAs при-

водит к улучшению морфологии поверхности выращенных на них буферных слоев CdTe. Однако при снижении температуры отжига менее 570 °С существенно ухудшается кристаллическое совершенство этих слоев на подложках GaAs(100) — полуширина кривой качания рентгеновской дифракции ( $FWHM = \Delta W$ ) увеличивается с 6 угл. мин ( $T_{ann} = 600; 590^\circ C$ ) до 40—55 угл. мин ( $T_{ann} = 530—570^\circ C$ ).

Кристаллическое совершенство слоев CdTe(111)В на подложках GaAs(111)В при понижении  $T_{ann}$  от 600 до 530 °С, наоборот, несколько улучшается —  $\Delta W$  уменьшается с 14 до 5 угл. мин.

Отжиг подложек проводили при температуре 590 °С, обеспечивающей получение качественных буферных слоев CdTe на подложках обеих ориентаций.

Для предростовой подготовки подложек GaAs представляется перспективным нанесение на стандартные пластины арсенида галлия высокочистого гомоэпитаксиального слоя GaAs из газовой фазы для последующего осаждения на него CdTe и CdHgTe. Основными требованиями к такому эпитаксиальному слою GaAs являются высокая чистота, кристаллическое совершенство и хорошая морфология поверхности.

Осаждение эпитаксиальных слоев арсенида галлия на подложки из GaAs проводили МОС-гидридным методом — по реакции взаимодействия арсина с триметилгаллием в потоке водорода в горизонтальном кварцевом реакторе при пониженном давлении (0,1 атм). Использовали высокочистые исходные реагенты и пластины полуизолирующего GaAs ориентации (100), (111)А, (111)В.

В предварительных экспериментах установлено, что в исследованных условиях зеркально гладкую поверхность могут иметь гомоэпитаксиальные слои, выращенные на подложках GaAs(100) и GaAs(111)А. На поверхности слоев, выращенных на подложках GaAs(111)В, образуются дефекты размером до нескольких десятков микрон в форме шестиугольных звезд (табл. 2).

Таким образом, газофазное нанесение гомоэпитаксиального слоя арсенида галлия на подложки GaAs(111)В только ухудшает морфологию ее поверхности. Эксперименты по осаждению буферных слоев CdTe на подложках GaAs(111)А и GaAs(111)В (без гомоэпитаксиального слоя) позволили сделать вывод о том, что в исследованных условиях зеркально гладкие слои CdTe растут только на подложках GaAs(111)В. Слои CdTe, выращенные на зеркальных подложках GaAs(111)А, имеют плохую морфологию поверхности, непригодную для последующего осаждения CdHgTe.

Таблица 1

Зависимость морфологии поверхности буферных слоев CdTe от температуры отжига подложек GaAs(111)В и GaAs(100) (время отжига 15 мин)

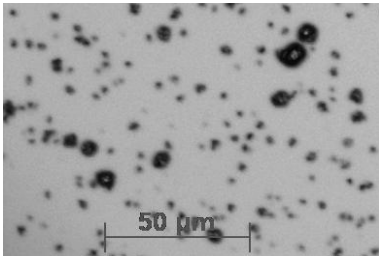
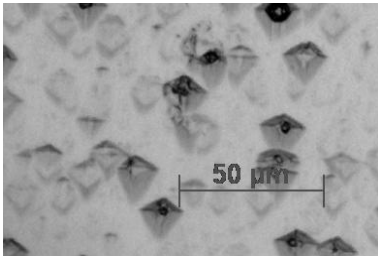
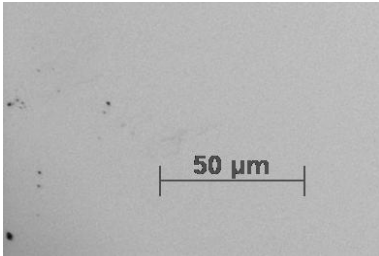
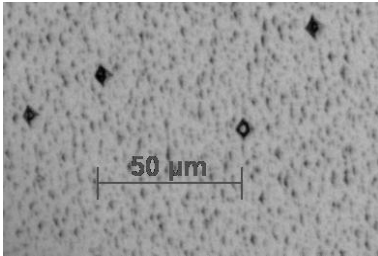
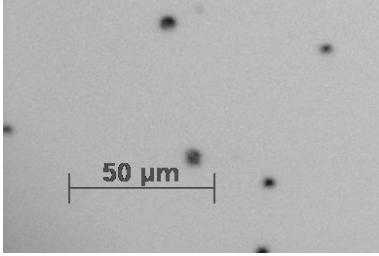
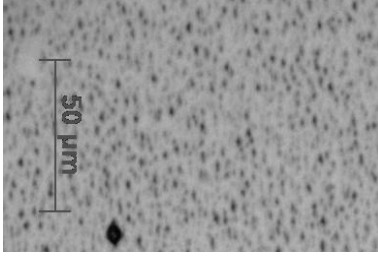
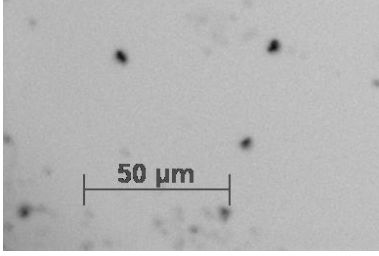
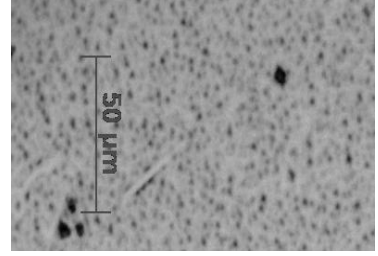
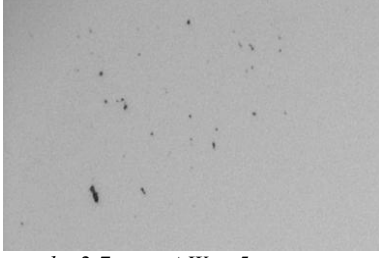
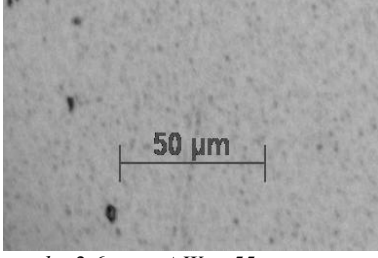
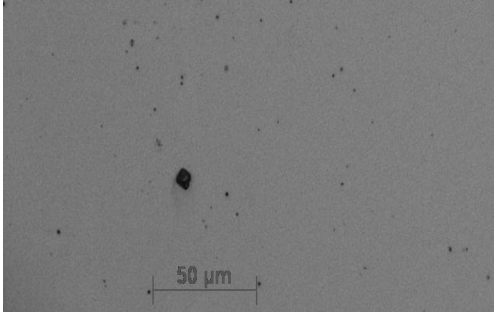
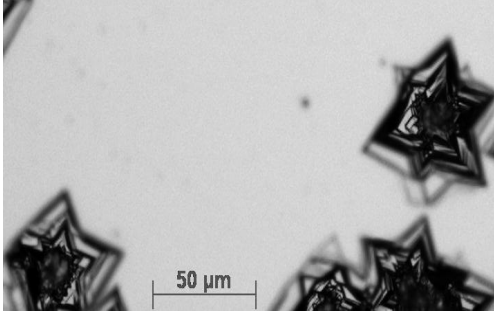
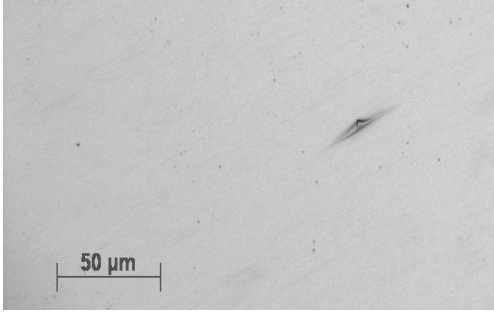
Температура отжига подложки, °С	Морфология поверхности слоев CdTe на подложках	
	GaAs(111)В	GaAs(100)
$T = 600\text{ °C}$	 <p><math>d = 3,84\text{ мкм}; \Delta W = 14\text{ угл. мин}</math></p>	 <p><math>d = 3,48\text{ мкм}; \Delta W = 6,2\text{ угл. мин}</math></p>
$T = 590\text{ °C}$	 <p><math>d = 3,69\text{ мкм}; \Delta W = 16\text{ угл. мин}</math></p>	 <p><math>d = 3,14\text{ мкм}; \Delta W = 6,5\text{ угл. мин}</math></p>
$T = 570\text{ °C}$	 <p><math>d = 3,7\text{ мкм}; \Delta W = 6,5\text{ угл. мин}</math></p>	 <p><math>d = 3,56\text{ мкм}; \Delta W = 42\text{ угл. мин}</math></p>
$T = 550\text{ °C}$	 <p><math>d = 2,5\text{ мкм}; \Delta W = 6,8\text{ угл. мин}</math></p>	 <p><math>d = 3,2\text{ мкм}; \Delta W = 44\text{ угл. мин}</math></p>
$T = 530\text{ °C}$	 <p><math>d = 3,7\text{ мкм}; \Delta W = 5\text{ угл. мин}</math></p>	 <p><math>d = 3,6\text{ мкм}; \Delta W = 55\text{ угл. мин}</math></p>

Таблица 2

**Зависимость морфологии поверхности МОС-гидридных эпитаксиальных слоев GaAs от ориентации подложки GaAs**

Ориентация подложки GaAs	Морфология поверхности эпитаксиального слоя GaAs/GaAs
(100) GaAs 41-3.1	
(111)B GaAs 112-3.2	
(111)A GaAs 112-3.2	

Из полученных результатов следует, что нанесение гомоэпитаксиальных слоев арсенида галлия на подложки из GaAs для последующего осаждения CdTe и КРТ целесообразно проводить только на подложки GaAs(100), поэтому последующие эксперименты по осаждению таких слоев арсенида галлия проводили только с использованием подложек GaAs(100) (с разориентацией поверхности  $2-4^\circ$  в направлении  $\langle 110 \rangle$ ).

Были подобраны условия осаждения (600—630 °С,  $\text{AsH}_3/\text{ТМГ} = 40-50$ , поток газа-носителя — водорода  $\sim 7-8$  л/ч, толщина слоя 3—5 мкм), при которых получают высокочистые (концентрация свободных носителей  $< 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ), высокоомные слои с зеркальной поверхностью и высоким кристаллическим совершенством. Спектры фотолю-

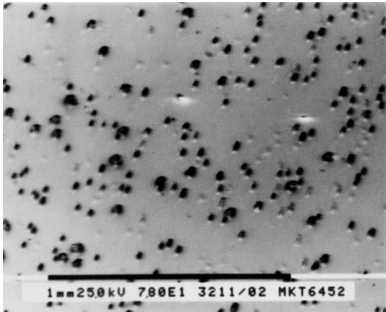
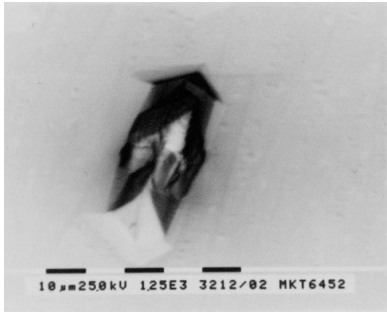
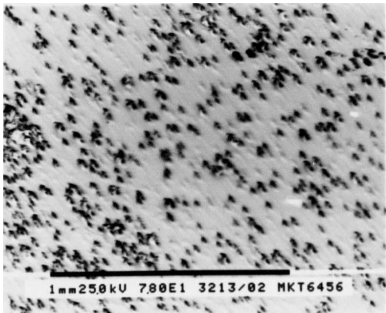
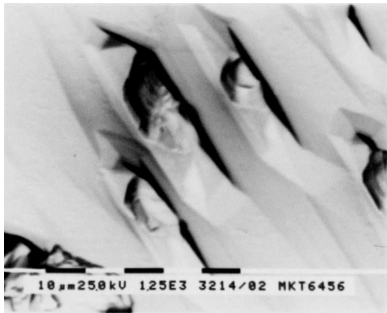

минесценции слоев GaAs при 4,2 К также подтверждают их высокое качество.

Подложки GaAs(100) с нанесенными на них гомоэпитаксиальными слоями высокочистого арсенида галлия использовали в качестве подложек при осаждении слоев CdHgTe.

Было исследовано влияние условий подготовки подложек GaAs(100) на морфологию и кристаллографическую ориентацию поверхности гетероструктуры КРТ/CdTe/GaAs (табл. 3). Использовали три методики подготовки подложек: 1-я — отжиг в потоке водорода при 590 °С в течение 15 мин, 2-я — то же, но с добавкой в водород арсина, 3-я — нанесение на поверхность подложки слоя высокочистого высокоомного арсенида галлия толщиной  $\sim 1$  мкм осаждением из паров триметилгаллия и арсина.

Таблица 3

**Влияние условий подготовки подложек из полуизолирующего GaAs(100) на морфологию поверхности выращенных на них эпитаксиальных слоев Cd<sub>0,2</sub>Hg<sub>0,8</sub>Te**

Условия подготовки подложки GaAs(100) и плотность дефектов, $N_{hil}$ , см <sup>-2</sup>	Морфология поверхности эпитаксиальных слоев CdHgTe, выращенных на подложках GaAs(100)/CdTe(100)	
	Увеличение ×80	Увеличение ×1250
Отжиг в потоке водорода при 590 °С в течение 15 мин, $N_{hil} = 9 \cdot 10^3$		
Отжиг в потоке водорода и арсина при 590 °С, в течение 15 мин, $N_{hil} = 2 \cdot 10^4$		
Выращивание эпитаксиального слоя GaAs из паров триметилгаллия и арсина (толщина слоя 1 мкм), $N_{hil} = 3,5 \cdot 10^3$		

Во всех трех случаях ориентация выращенных слоев КРТ совпала с ориентацией подложки, т. е. выращены структуры Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te(100)/CdTe (100)/GaAs(100). Фаза (111) в КРТ и CdTe отсутствовали. Полуширина кривой качания рентгеновской дифракции, характеризующая кристаллическое совершенство слоев КРТ, при указанных методиках подготовки подложек существенно не отличалась и составляла величину 3—4 угл. мин. Поверхностная плотность ростовых дефектов (hillocks) в слоях КРТ в случае нанесения гомоэпитаксиального слоя арсенида галлия на подложки была в три—четыре раза меньше, чем без него (10<sup>3</sup> см<sup>-2</sup>). При использовании подложки GaAs(100), отожженной в потоке водорода с арсином, плотность дефектов

(hillocks) в слоях КРТ выросла в два раза по сравнению с отжигом подложки в потоке водорода.

**Выводы**

1. Подложки GaAs(100) для МOCVD-эпитаксии слоев CdTe необходимо отжигать при температуре 580—590 °С в потоке водорода ( $P = 1$  атм, 15 мин). Дальнейшее увеличение температуры приводит к ухудшению морфологии поверхности выращиваемых на них буферных слоев CdTe, а уменьшение температуры — к ухудшению их кристаллического совершенства.

2. Подложки GaAs(111)В предпочтительнее отжигать при более низкой температуре 530—550 °С, так как снижение ее позволяет улучшить морфо-

логию поверхности и кристаллическое совершенство CdTe.

3. Нанесение гомоэпитаксиального слоя арсенида галлия на подложки GaAs(100), по-видимому, залечивает дефекты поверхности подложек, возникающие в процессе их изготовления, и при оптимизации условий его нанесения может служить эффективным средством уменьшения плотности ростовых дефектов (hillocks) на поверхности MOCVD-гетерослоев  $Cd_xHg_{1-x}Te(100)/CdTe(100)/GaAs(100)$ .

#### Л и т е р а т у р а

1. Shtrikman H, Oron M, Raizman A, Cinader G.// J. Electronic. Mat. 1988, V. 17. № 2. P. 105.
2. Feldman R. D., Austin R. F., Kisker D. W., Jeffers K. S., Bridenbaugh P. M.// Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48. No. 3. P. 248.
3. Anderson P. L.// J. Vac. Sci. Technol. 1986. V. 4. No. 4. P. 2162.
4. Моисеев А. Н., Батманов С. М., Ливерко В. Н.// Высокочистые вещества. 1994. № 4. С. 136.
5. Piotrowski A., Madejczik P., Gawron W., Ktos K., Romanis M., Grudzien M., Piotrowski I., Rogalski A.// Opto-Electronics Review. 2004. V. 12. No. 4. P. 453.
6. Деярых Г. Г., Котков А. П., Ливерко В. Н., Моисеев А. Н.// ДАН. 1995. Т. 340. № 3. С. 331—333.

## Investigation of the effect of preparation of GaAs substrates surface on the properties of MOCVD-epitaxial layers of CdTe and CdHgTe

A. P. Kotkov, A. N. Moiseev, N. D. Grishnova, A. V. Chilyasov

Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the Russian Academy of Sciences,  
49 Tropinin str., 603950, Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: grichnova@bk.ru

*The effect of pre-growth preparation of GaAs substrates on crystal perfection and morphology of the surface with grown MOCVD-layers of CdTe and  $Cd_xHg_{1-x}Te$  is investigated. It is shown that the optimum annealing temperature for GaAs(100) substrates in hydrogen environment is 580—590 °C and for GaAs(111)B substrates is 530—550 °C. At higher annealing temperature the surface morphology of the grown CdTe layers degrades and at lower temperature a degradation of their crystal perfection is observed. Application of homoepitaxial layer of gallium arsenide on GaAs(100) substrates can be used as an effective technique to reduce the density of hillocks on the surface of  $Cd_xHg_{1-x}Te(100)/CdTe(100)/GaAs(100)$  heterolayers.*

PACS: 73.61.Ga; 81.15.Gh

*Keywords:* substrate, morphology, surface, temperature, heterolayer.

Bibliography — 6 references.

Received 8 October 2009