ФОТОЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.315.5

Исследование эпитаксиальных гетероструктур $Cd_xHg_{1-x}Te$ методами травления

А. С. Кашуба, Е. В. Пермикина

Представлены способы выявления дислокаций в эпитаксиальных слоях гетероструктур теллурида кадмия-ртути, выращенных молекулярно-лучевой эпитаксией. Путем поочередного селективного и полирующего травления обнаружены краевые дислокации, дислокации смешанного типа с винтовой составляющей и дислокационные петли. Полирующее травление позволило выявить скопление примесей в ГЭС КРТ МЛЭ на границах двойникования. При помощи селективного травления исследованы распределения плотности дислокаций на участках поверхности ГЭС КРТ МЛЭ и определена плотность дислокаций в слоях, которая на разных образцах составила от 3×10^6 до 8×10^6 на один квадратный сантиметр.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Ключевые слова: гетероэпитаксиальные структуры КРТ, дислокации, полирующее травление, селективное травление.

Введение

Одним из основных материалов для производства матричных фотоприемных устройств, работающих в ИК-спектральной области, являются многослойные эпитаксиальные гетероструктуры (ГЭС) теллурида кадмия-ртути (КРТ) [1—6]. ГЭС КРТ, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), отличаются хорошей плоскостностью поверхности и довольно однородным распределением состава по площади. Плотность дислокаций в слоях КРТ МЛЭ, выращенных на подложках из арсенида галлия, обычно составляет порядка 10^5—10^6 см$^{-2}$.

В случае если плотность дислокаций превышает допустимую (более 10^6 см$^{-2}$), в слоях $Cd_xHg_{1-x}Te$ образуются дислокационные кластеры. При определенных температурных условиях дислокации могут взаимодействовать между собой, образуя дислокационные петли внутри слоев КРТ. Образование дислокационных петель более выгодно энергетически при соотношении диаметра и толщины структуры ГЭС КРТ как 2 дюйма к 50 мкм при типичной плотности дислокаций порядка 10^6 см$^{-2}$ [7]. Развитие и перемещение дислокаций в эпитаксиальных слоях определяется условиями роста и температурной историей образцов, и, следовательно, изменяется от образца к образцу.

Обычно вдоль дислокационных линий происходит сегрегация примесей, являющихся причинами рекомбинации носителей заряда, поэтому скопления дислокаций способствуют возрастанию токов утечек и шумов в матричных фотодиодах.

В данной работе представлены результаты исследований по выявлению дислокаций в слоях ГЭС КРТ МЛЭ методами полирующего и селективного травления.

Методика исследования

Исследовались эпитаксиальные гетероструктуры $Cd_xHg_{1-x}Te$ *p*-типа проводимости, выращенные в ИФП СО РАН молекулярно-лучевой эпитаксией на подложках из GaAs ориентации (310) по техническим условиям 1778-333/0-0198396-11ТУ, после селективного и полирующего травления. Образцы имели следующие исходные параметры рабочего слоя: состав x = 0,224±0,002, толщина d = 8÷9 мкм, концентрация основных носителей заряда $p = 7{,}0\times10^{15}\div1{,}3\times10^{16}$ см$^{-3}$ и их подвижность $\mu = 400\div550$ см^2 В$^{-1}$ с$^{-1}$.

Кашуба Алексей Сергеевич, ведущий инженер-технолог.
Пермикина Елена Вячеславовна, ведущий инженер.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел.: 8 (919) 139-78-57, 8 (909) 682-15-37.
E-mail: ORION_KASHUBA@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2016 г.

© Кашуба А. С., Пермикина Е. В., 2016

При выявлении плотности дислокаций в слоях ГЭС КРТ применялся раствор для селективного травления, в состав которого входили такие компоненты, как хромовый ангидрид, соляная и винная кислоты. Подбирались количественные соотношения компонентов и режимы травления.

Определение винтовых дислокаций и дислокационных петель в эпитаксиальных слоях проводилось путем поочередной обработки образцов в растворах для селективного и полирующего травления. Наиболее оптимальным оказался следующий режим обработки: селективный — 30 секунд; полирующий — 40 секунд; селективный — 30 секунд.

Морфология поверхности ГЭС КРТ (310) исследовалась также после обработки в растворе для полирующего травления. В составе полирующего травителя: бром, перекись водорода, метанол и этиленгликоль [8].

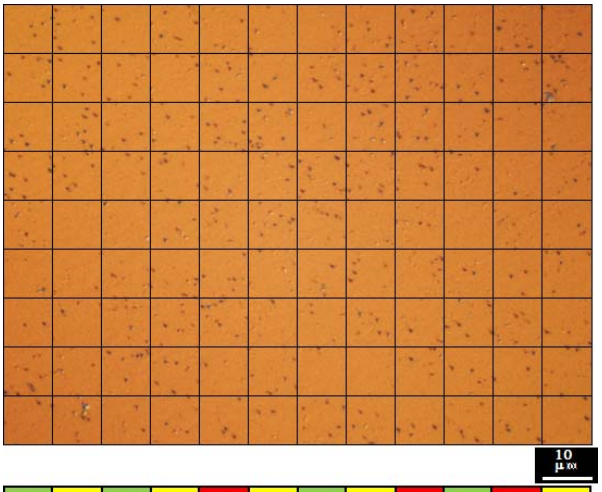
Поверхность эпитаксиального слоя ГЭС КРТ наблюдалась при помощи оптического микроскопа Номарского и электронных микроскопов Jeol-35CF и Tescan Miraj.

Результаты и обсуждение

Исследования поверхности образцов ГЭС КРТ МЛЭ после селективного травления показали, что плотность дислокационных ямок травления составляет от 3×10^6 до 8×10^6 см$^{-2}$. На рис. 1 представлено оптическое изображение ямок травления на отдельном фрагменте эпитаксиальной ГЭС КРТ МЛЭ площадью 120×90 мкм^2. Фрагмент разделен на квадраты 10×10 мкм^2 (рис. 1, сверху), в каждом квадрате таблицы (рис. 1, снизу) отмечено число дислокаций на определенном участке поверхности. Цветом обозначено предельное значение числа дислокаций для каждого квадрата: зеленый — (1—5) шт., желтый — (5—10) шт., красный — более 10 шт.

Для сравнения плотности распределения дислокаций на участках поверхности фрагментов ГЭС КРТ размерами 120×10 мкм^2 и 90×10 мкм^2 построены диаграммы, представленные на рис. 2 и 3. На диаграммах для участков размерами 120×10 мкм^2 (ряды № 1, № 8 сверху вниз таблицы рис. 1) заметно неравномерное распределение дислокационных ямок травления по длине полос.

Для построения диаграммы распределения дислокаций по поверхности фрагмента ГЭС КРТ шириной 90 мкм и длиной 120 мкм количество дислокационных ямок травления суммировалось по столбцам таблицы рисунка 1.



4	9	5	10	12	6	5	10	14	5	11	7
10	6	8	8	9	4	7	11	10	7	6	13
5	12	8	9	14	11	4	8	8	6	4	5
10	8	6	7	5	10	10	14	9	10	8	10
13	1	7	7	8	12	12	3	11	1	11	8
5	4	6	7	9	10	8	6	8	13	4	7
2	4	12	8	10	5	7	7	5	8	8	8
11	5	10	8	3	10	1	4	7	6	5	9
4	14	6	8	5	3	9	8	5	7	8	5

Рис. 1. Фрагмент ГЭС КРТ МЛЭ размером 120×90 мкм^2. Сверху — оптическое изображение дислокационных ямок травления; снизу — таблица распределения дислокаций.

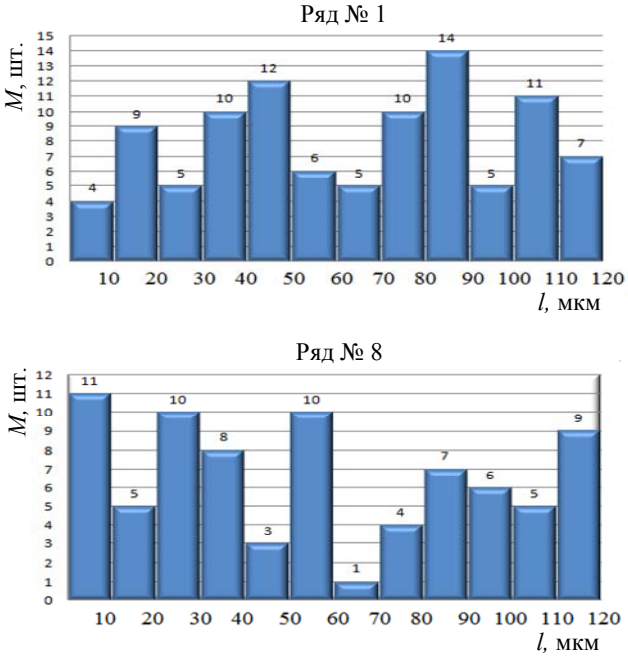


Рис. 2. Диаграммы распределения числа дислокаций M по поверхности фрагмента ГЭС КРТ в полосах шириной 10 мкм и длиной l = 120 мкм (для рядов № 1 и № 8).

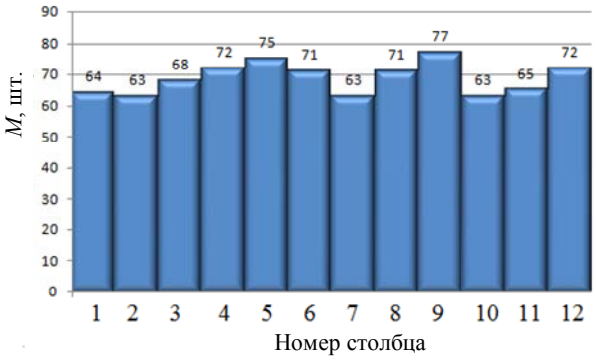


Рис. 3. Диаграмма распределения числа дислокаций M в столбцах размерами 90×10 мкм² для фрагмента ГЭС КРТ МЛЭ 90×120 мкм².

Как видно из диаграммы, для фрагментов размером 90×10 мкм^2 характерно однородное распределение плотности дислокаций (рис. 3) в отличие от фрагментов размером 10×10 мкм^2, что объясняется малым числом дислокаций в фрагментах размером 10×10 мкм^2. В среднем плотность ямок травления на разных образцах составила от 3×10^6 до 8×10^6 на см$^{-2}$, неоднородность распределения по пластине не превышала 30 %.

При поочередной обработке образцов в селективном и полирующем травителях наблюдались дислокационные ямки травления, отличающиеся конфигурацией — равнобедренные и равносторонние треугольники и треугольники с «удлиненной» стороной. Это свидетельствует о наличии в слоях ГЭС КРТ дислокаций разного типа. Для эпитаксиальных слоев КРТ наиболее характерно развитие винтовых дислокаций и дислокаций смешанного типа с преобладанием винтовой составляющей [7, 9].

На рис. 4 представлено электронно-микроскопическое изображение эпитаксиальной поверхности КРТ после поочередной обработки селективным и полирующим травителями. В результате травления внутри эпитаксиального слоя ГЭС КРТ были выявлены дислокации смешанного типа с винтовой составляющей, а также краевые дислокации (их было значительно меньше) и дислокационные петли.

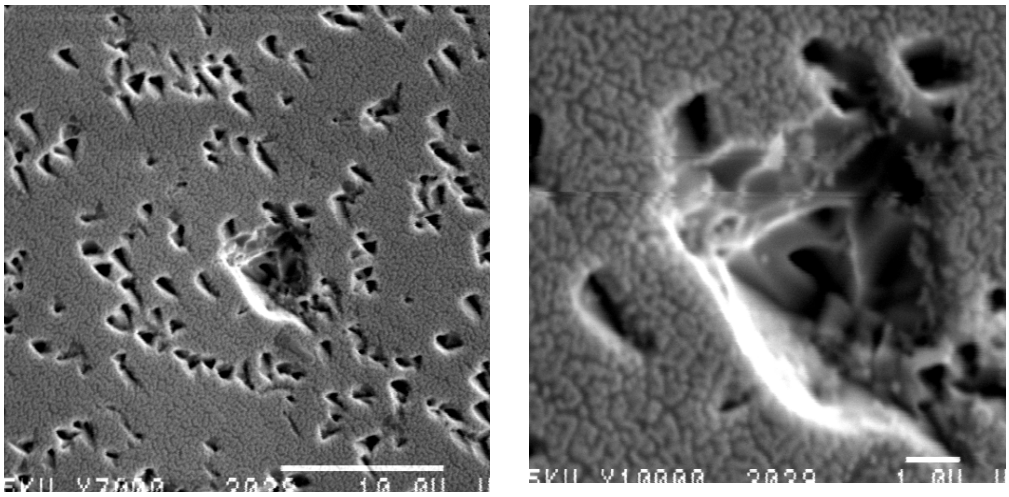


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение поверхности ГЭС КРТ после травления в селективном и полирующем травителях при увеличении 700ˣ (слева) и 1000ˣ (справа).

Как известно, на дислокационных петлях рост слоя идет по слоисто-спиральному механизму. К тому же вдоль дислокационных линий происходит сегрегация примесей, находящихся в растущих слоях. В связи с этим винтовые дислокации, в особенности дислокационные петли, становятся причиной трехмерного роста, который и приводит к образованию и росту бугорков (холмиков).

Бугорки, выявленные в процессе полирующего травления поверхности ГЭС КРТ, образуются в местах выходов дислокаций вследствие неодинаковых скоростей травления материала КРТ и примесей, адсорбированных на выходах дислокаций [9]. Бугорки травления отличаются размерами. По-видимому, размеры бугорков зависят от количества сегрегированной примеси вдоль дислокационных линий.

На рис. 5 представлено электронно-микроскопическое изображение эпитаксиального слоя ГЭС КРТ после обработки в растворе для полирующего травления. На границе двойникования образовались крупные бугорки. Это связано с тем, что именно границы двойникования являются стоками дислокаций и примесей.

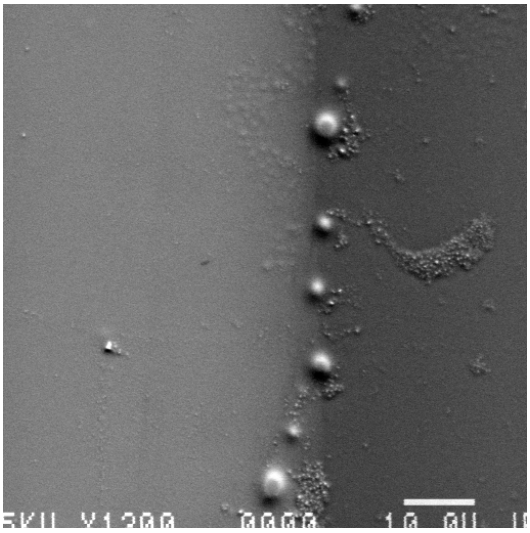


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение бугорков травления в местах выходов дислокаций с сегрегированной примесью на границе двойникования после полирующего травления ГЭС КРТ.

Бугорки могут являться причиной закрепления преципитатов теллура и образования ростовых дефектов.

Заключение

Приведенные в работе способы травления позволяют выявлять в слоях ГЭС КРТ МЛЭ дислокации различного типа. Методом поочередного селективного и полирующего травления обнаружены краевые дислокации, дислокации смешанного типа с винтовой составляющей и дислокационные петли. Полирующее травление позволило выявить скопление примесей в ГЭС КРТ МЛЭ на границах двойников. При помощи селективного травления определена плотность дислокаций в слоях ГЭС КРТ, которая на разных образцах составила от 3×10^6 до 8×10^6 на один квадратный сантиметр.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Boltar K. O., Burlakov I. D., Ponomarenko V. P., Filachev A. M.* // Proceedings of SPIE. 2009. Vol. 4298. P. 72982P.
2. *Филачёв А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А.* Твердотельная электроника. — М: Физматкнига, 2005.
3. *Болтарь К. О., Бовина Л. А., Бурлаков И. Д., Головин С. В., Иванов В. Ю., Сагинов И. Л.* // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 32.
4. *Boltar K. O., Bovina L. A., Burlakov I. D., Golovin S. V., Ivanov V. I., Saginov L. D.* // Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 4340. P. 23.
5. *Boltar K. O., Burlakov I. D., Golovin S. V., Saginov L. D., Akimov V. M., Jakovleva N. I.* // Proceedings of SPIE. 2005. Vol. 5957. P. 59570H1.
6. *Болтарь К. О., Корольков В. В., Фролов А. В., Косарев А. А., Петров И. Н.* / Материалы VIII всесоюзного симпозиума «Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы», часть II. Львов. 1990. С. 14.
7. *Chang Y., Becker C. K., Grein C. H., Zhao J., Fulk C, Casselman T., Kiran R.* // J. of Electronic Materials. 2008. Vol. 37. No. 9. P. 1171.
8. Патент RU № 2542894 Состав полирующего травителя для теллурида кадмия-ртути.
9. *Логинов Ю. Ю., Браун П. Д., Дьюроуз.* Закономерности образования структурных дефектов в полупроводниках A^2B^6. — М.: Логос, 2003.

The investigation of the $Cd_xHg_{1-x}Te$ multilayered structures by etching techniques

A. S. Kashuba and E. V. Permikina

Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: ORION_KASHUBA@mail.ru

Received November 10, 2016

Consideration is given to ways to identify dislocations in the epitaxial mercury cadmium telluride heterostructures grown by the molecular beam epitaxy. The edge dislocations, the dislocation of the mixed type with a screw component and dislocation loops have been detected by alternately selective etching and polishing. Accumulation of impurities in MCT MBE on the borders of the twinning has been revealed by the polishing etching. A distribution of the dislocation density in the areas of the HgCdTe MBE surface has been investigated with selective etching. The densities of dislocations in the layers have been determined. Their values are different for samples and vary from 3×10^6 to 8×10^6 cm^{-2}.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Keywords: heteroepitaxial structures, MCT, dislocations, polishing etching, selective etching.

REFERENCES

1. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, Proceedings of SPIE **4298**, 72982P (2009).

2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Electronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].

3. K. O. Boltar, L. A. Bovina, I. D. Burlakov, S. V. Golovin, V. Yu. Ivanov, and I. L. Saginov, Prikl. Fiz., No. 3, 32 (1999).

4. K. O. Boltar, L. A. Bovina, I. D. Burlakov, S. V. Golovin, V. Yu. Ivanov, and I. D. Saginov, Proceedings of SPIE **4340**, 23 (2000).

5. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, S. V. Golovin, L. D. Saginov, V. M. Akimov, and N. I. Iakovleva, Proceedings of SPIE **5957**, 59570H1 (2005).

6. K. O. Boltar, V. V. Korolkov, A. V. Frolov, A. A. Kosarev, I. N. Petrov, in *Proc. VIII All-Union Symposium on Semiconductors*, part II (Lvov, 1990). P. 14.

7. Y. Chang, C. K. Becker, C. H. Grein, J. Zhao, C. Fulk, T. Casselman, and R. Kiran, J. Electronic Materials **37**, 1171 (2008).

8. RU Patent. No.2542894.

9. Yu. Yu. Loginov, P. D. Brown, and Dyurous, *Regularity of the Structural Defects in the A2B6 Semiconductors* (Logos, Moscow, 2003) [in Russian].