

УДК 621.383.4/5

Исследование гетероэпитаксиальных структур CdHgTe методом спектроскопической эллипсометрии

П. С. Скробнева, И. Д. Бурлаков, Н. И. Яковлева

Исследуются возможности метода спектроскопической эллипсометрии как бесконтактного метода изучения важнейших параметров полупроводниковых гетероструктур с наноразмерными слоями. Методом неразрушающей спектроскопической эллипсометрии определен состав, толщина, коэффициент преломления рабочих и вспомогательных слоев гетероэпитаксиальной структуры КРТ, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

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

Ключевые слова: CdHgTe, КРТ, гетероэпитаксиальные структуры, ГЭС, фотоприемное устройство, ФПУ, молекулярно-лучевая эпитаксия, МЛЭ, эллипсометрия.

Введение

Для промышленного производства матричных фотоприемных устройств (ФПУ) наиболее перспективным исходным материалом являются гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) тройного соединения кадмий-ртуть-теллур (КРТ), выращиваемые методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [1—4]. Этот метод позволяет получать структуры большого диаметра с задаваемыми в процессе роста свойствами слоев, хорошей морфологией и плоскостностью поверхности, максимально пригодной для дальнейших технологических операций [5—8]. Эпитаксиальный слой фоточувствительного материала КРТ выращивается на оптически прозрачной в рабочем спектральном диапазоне подложке. Конструкция фотодиодной матрицы такова, что детектируемое фотодиодами излучение, вводится через подложку.

Метод МЛЭ к настоящему времени активно вытесняет остальные методы выращивания эпитаксиальных структур КРТ, что отмечается в маркетинговых исследованиях [9]. Основными преимуществами метода МЛЭ, обеспечившими выход этого метода на лидирующие позиции, являются:

– возможность выращивания слоев КРТ как на совместимой по параметру кристаллической решетки подложке, так и на альтернативных подложках со значительным рассогласованием параметров кристаллической решетки;

– возможность управляемого последовательного выращивания в едином цикле буферных слоев и слоев КРТ различного состава и типа проводимости, обеспечиваемого легированием примесью в процессе роста;

– получение зеркально-гладких слоев с хорошей морфологией и плоскостностью поверхности.

Для контроля тонких эпитаксиальных слоев в процессе выращивания необходим неразрушающий (бесконтактный) метод контроля, который позволяет анализировать качество образца непосредственно в ростовой камере. Одним из возможных методов является метод спектроскопической эллипсометрии [10, 11], который позволяет в режиме реального времени (*in-situ*) изучать свойства поверхности эпитаксиальной структуры, границ раздела, измерять толщину и показатели преломления тонких эпитаксиальных слоев.

Целью данной работы являлось исследование возможностей метода спектроскопической эллипсометрии для изучения важнейших параметров полупроводниковых КРТ-гетероструктур с наноразмерными слоями.

Метод измерений

Спектроскопическая эллипсометрия используется для определения оптических параметров многослойных структур. Стандартные измерения подразумевают схему измерений, при которой пучок излучения отражается или проходит через тестируемый образец. При отражении излучения от

Скробнева Полина Станиславовна, инженер НИЦ¹.

Бурлаков Игорь Дмитриевич, зам. генерального директора по инновациям и науке², профессор².

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ¹.

¹ОАО «НПО «Орион»».

Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.

Тел. (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА). Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 11 августа 2014 г.

© Скробнева П. С., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., 2014

поверхности образца изменяется поляризация излучения, т. е. излучение «эллиптически поляризуется», что и отражает основную суть метода [12]. В некоторых случаях падающее излучение уже является эллиптически поляризованным.

Схема реализации метода при отражении излучения от тестируемого образца представлена на рис. 1.

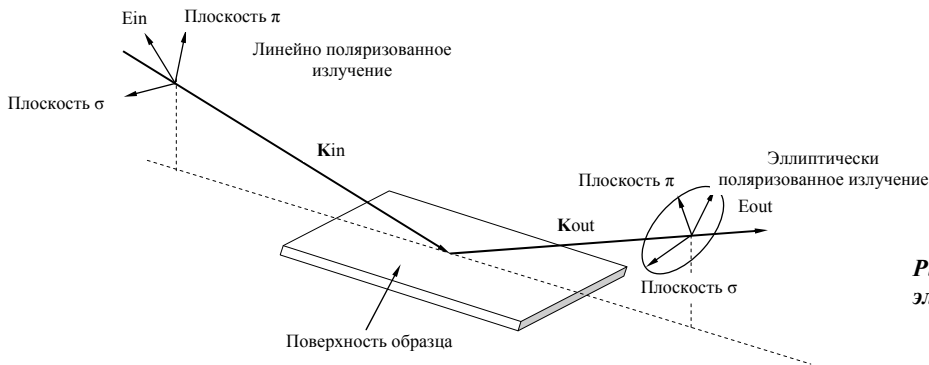


Рис. 1. Схема реализации метода эллисометрии

Падающее излучение представляет собой монохроматическую плоскую волну, которая направляется на поверхность образца под некоторым углом падения, причем плоскость падения перпендикулярна поверхности исследуемого образца. Волновой вектор, который описывает падающее излучение, обозначается \mathbf{k}_{in} . Вектору \mathbf{k}_{in} перпендикулярны два вектора: вектор электрического поля \mathbf{E} и вектор магнитного поля \mathbf{B} . На рис. 1 представлен только электрический вектор \mathbf{E} , который линейно поляризован. Вектор \mathbf{E} проецируется на две плоскости: параллельную и перпендикулярную плоскости падения, которые обозначаются символами π и σ , соответственно, их можно также представить как амплитудную и фазовую составляющие. Когда падающая волна отражается от поверхности образца, она становится эллиптически поляризованной, при этом значения векторов π и σ изменяются.

Параметры, измеряемые эталонным фотоприемником, который детектирует излучение с эллипсометрической поляризацией представляются величинами ψ и Δ . Эллипсометрические параметры однозначно связаны с коэффициентами отражения в параллельной и перпендикулярной плоскостях, т. е. ρ_π и ρ_σ . Основное уравнение эллисометрии задается комплексным соотношением коэффициентов отражения и эллипсометрическими параметрами [10—13].

$$\rho = \frac{\rho_\pi}{\rho_\sigma} = \tan(\psi) \exp(j\Delta).$$

Таким образом, используя свойство поляризации излучения, можно вычислять оптические параметры и толщину полупроводниковых мате-

риалов, включая объемные и эпитаксиальные структуры.

Несмотря на достаточно высокую чувствительность метода, для эллипсометрических измерений необходим строго поляризованный пучок излучения. Пучок излучения является поляризованным, если соотношение фаз между различными компонентами электромагнитного поля остается

определенным и предсказуемым. При частично поляризованном свете эллипсометрические измерения не реализуются.

Основные уравнения, связывающие эллипсометрические и физические параметры образца

Установим связь между эллипсометрическими параметрами ψ и Δ с комплексным показателем преломления \tilde{n} . На рис. 2 представлена схема падения излучения на границу раздела двух сред, при этом θ_0 — угол падения луча, θ_1 — угол преломления.

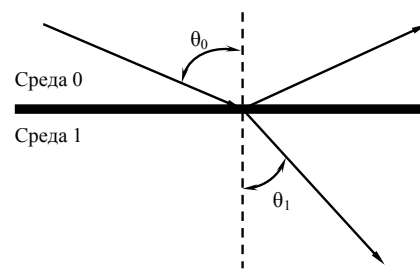


Рис. 2. Схема падения излучения на границу раздела двух сред

Основные уравнения, связывающие коэффициенты отражения ρ_π and ρ_σ с коэффициентом преломления, представляются уравнениями Френеля [13]:

$$\rho_\pi = \frac{\tilde{n}_1 \cos(\theta_0) - \tilde{n}_0 \cos(\theta_1)}{\tilde{n}_1 \cos(\theta_0) + \tilde{n}_0 \cos(\theta_1)},$$

$$\rho_\sigma = \frac{\tilde{n}_0 \cos(\theta_0) - \tilde{n}_1 \cos(\theta_1)}{\tilde{n}_0 \cos(\theta_0) + \tilde{n}_1 \cos(\theta_1)},$$

при этом $\cos(\theta_1)$ определяется по закону Шелла:

$$\cos(\theta_1) = \sqrt{1 - \left(\frac{\tilde{n}_0}{\tilde{n}_1}\right)^2 \sin^2(\theta_0)},$$

где \tilde{n}_0 — комплексный показатель преломления нулевой среды;

\tilde{n}_1 — комплексный показатель преломления первой среды.

Комбинируя выше представленные уравнения, можно выразить комплексный показатель преломления первой среды в явном виде через параметры нулевой среды и эллипсометрические параметры:

$$\tilde{n}_1 = \frac{\sqrt{C} \cdot \tilde{n}_0 \sin(\theta_0)}{\cos(\theta_0) \cdot (1 + \tan(\psi) \exp(j\Delta))},$$

$$C = 1 - 4 \sin^2(\theta_0) \tan(\psi) \exp(j\Delta) + 2 \tan(\psi) \exp(j\Delta) + \tan^2(\psi) \exp(j\Delta).$$

Эллипсометрия часто используется для определения толщин тонких пленок или слоев, выращиваемых на поверхности оптически прозрачной подложки, как представлено на рис. 3. Данная структура получила в литературе название трехфазной [13].

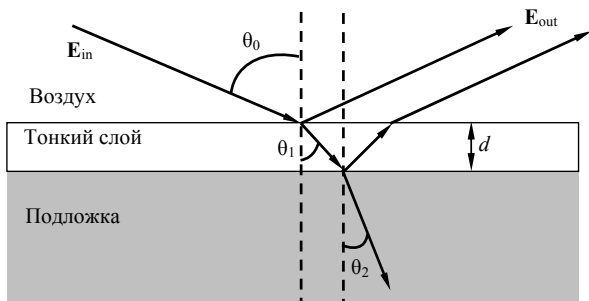


Рис. 3. Схема прохождения излучения в трехфазной структуре

При этом необходимо учитывать многократные отражения излучения в тонком образце, которые приводят к явлению интерференции излучения.

Если коэффициенты преломления трехфазной системы известны, то возможно определить толщину слоя, выращенного на подложке, т. к. эллипсометрические параметры однозначно связаны с параметрами структуры и излучения.

Коэффициенты отражения поляризованного излучения трехфазной системы описываются уравнениями:

$$P_\sigma = \frac{\rho_{01,\sigma} + \rho_{12,\sigma} \exp(-j2\beta)}{1 + \rho_{01,\sigma} \rho_{12,\sigma} \exp(-j2\beta)},$$

$$P_\pi = \frac{\rho_{01,\pi} + \rho_{12,\pi} \exp(-j2\beta)}{1 + \rho_{01,\pi} \rho_{12,\pi} \exp(-j2\beta)},$$

где символом ρ отмечены коэффициенты отражения на границах раздела сред (см. рис. 2), а коэффициент β выражается формулой [13]

$$\beta = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d}{\lambda} \cdot \tilde{n}_1 \cos(\theta_1).$$

Заменяя коэффициенты отражения в основном уравнении на коэффициенты отражения трехфазной системы, получим

$$P = \frac{P_\pi}{P_\sigma} = \tan(\psi) \exp(j\Delta).$$

Проведя соответственные преобразования основного уравнения после подстановки P_σ и P_π , можно получить квадратное уравнение относительно аргумента X , где $X = \exp(-j2\beta)$. При этом X выражается через коэффициенты отражения на границах раздела. Логарифмируя X и подставляя формулу для коэффициента β , получаем уравнение

$$\ln(X) = -j4\pi \frac{d}{\lambda} \tilde{n}_1 \cos(\theta_1),$$

из которого можно в явном виде выразить толщину тонкого слоя

$$d = \frac{j \ln(X) \lambda}{4\pi \tilde{n}_1 \cos(\theta_1)}.$$

Очевидно, что толщина слоя d должна быть величиной действительной и положительной. При возможных неточностях или ошибках может оказаться, что толщина представляется комплексным числом. В этом случае рассчитанная толщина d принимается равной действительному значению числа, а мнимая его часть должна быть минимальна (при тщательных расчетах).

Результаты исследований

Расчет параметров многослойной структуры КРТ основывался на следующих положениях: полученные при измерении данные должны быть связаны с оптическими параметрами ГЭС КРТ и толщиной входящих в ее состав эпитаксиальных слоев, при этом модель также учитывала угол падения, длину волны и поляризацию падающего излучения [14]. Для тестируемого образца строилась математическая модель, зависящая от ряда параметров, которая методом итераций приближалась к измеренным данным с некоторой погрешностью. При этом окончательные параметры структуры выбирались из условия, что погреш-

ность приближения экспериментальных данных и теоретической модели должна быть минимальной [15].

Количественным показателем соответствия численного решения являлся коэффициент χ^2 , который представляет среднеквадратичное отклонение между теоретическими и экспериментальными данными. Он в общем случае, вычисляется по формуле:

$$\chi^2 = \frac{1}{N - M - 1} \sum \frac{(\psi^T - \psi^E)^2}{\delta_\psi^2} + \frac{(\Delta^T - \Delta^E)^2}{\delta_\Delta^2} + \frac{(R^T - R^E)^2}{\delta_R^2},$$

где N — число точек измерения,

M — количество параметров,

$\text{tg}\Psi$ — отношение амплитуд коэффициентов отражения волн π - и σ - поляризации;

Δ — разность фаз волн π - и σ - поляризации.

R — коэффициент отражения,

δ — означает погрешность оценки, которая обычно находится в районе от 0,5 до 0,1 %.

В табл. 1 приведены значения толщин слоев структуры и значения показателя χ^2 , при которых считается, что расчет проводится корректно:

Таблица 1

| Толщина | χ^2 |
|---------|----------------|
| 20 Å | $\chi^2 < 1,5$ |
| 2000 Å | $\chi^2 < 3$ |
| 10000 Å | $\chi^2 < 6$ |
| 25000 Å | $\chi^2 < 10$ |

В качестве исследуемого образца использовалась гетероэпитаксиальная структура КРТ, расположение и толщины слоев которой представлены в табл. 2.

Таблица 2

| Слой | Толщина |
|-----------------------------|----------------|
| Верхний варизонный слой КРТ | 0,4 мкм |
| Фоточувствительный слой КРТ | 7,8 мкм |
| Нижний варизонный слой КРТ | 1,4 мкм |
| Второй буферный слой | (CdTe) 5,3 мкм |
| Первый буферный слой | (ZnTe) 0,1 мкм |
| Подложка | (GaAs) |

Структура содержала оптически прозрачную подложку GaAs, на которой располагались буферные слои ZnTe и CdTe, нижний варизонный слой CdHgTe толщиной ~ 1,4 мкм, фоточувствительный рабочий слой CdHgTe толщиной ~ 8 мкм, верхний варизонный слой CdHgTe толщиной ~ 0,4 мкм. Об-

разец имел распределение содержания кадмия Cd в рабочем фоточувствительном слое КРТ, показанное на рис. 4 и характеризующееся параметром $x = 0,23$.

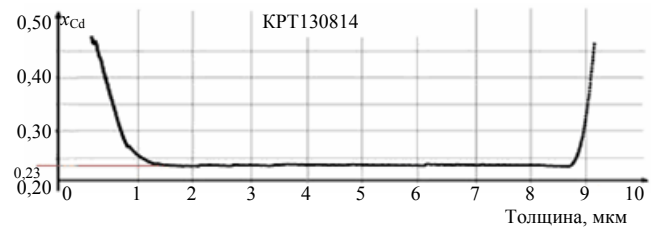
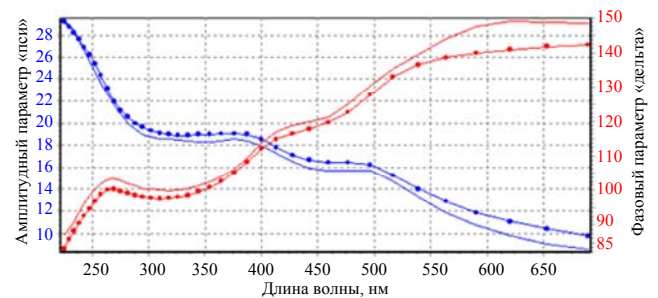


Рис. 4. График распределения кадмия в структуре

Исследования гетероструктуры КРТ проводились на эллипсометре UVISEL фирмы NYTEC instruments. Погрешность угловых измерений не превышала 0,01—0,02°, толщина слоев ГЭС КРТ вычислялась с погрешностью 1 нм. Структура исследуемого образца и начальные результаты моделирования представлены на рис. 5.



а) результаты исследований

| | | | |
|---|--------------------------|---------|------------------------|
| 5 | <input type="checkbox"/> | 4000.0 | Hg1-xCdxTe.aly (0.420) |
| 4 | <input type="checkbox"/> | 78000.0 | Hg1-xCdxTe.aly (0.222) |
| 3 | <input type="checkbox"/> | 14000.0 | Hg1-xCdxTe.aly (0.100) |
| 2 | <input type="checkbox"/> | 53000.0 | CdTe_asp.ref |
| 1 | <input type="checkbox"/> | 1000.0 | ZnTe_exc.dsp |
| 0 | <input type="checkbox"/> | | GaAs_HJY.ref |

б) структура образца

Рис. 5. Зависимость эллипсометрических параметров от длины волны (а): измеренные данные (точки) и теоретическая кривые (сплошная линия) и структура образца ГЭС КРТ (б)

Начальная погрешность приближения экспериментальных и теоретических данных составила $\chi^2 = 7,7$ %. После дополнительного варьирования параметров (толщины эпитаксиальных слоев, состава рабочего слоя, показателей преломления) был получен наилучший результат соотношения амплитудного и фазового эллипсометрических коэффициентов (рис. 6). Значение среднеквадратичной погрешности составило $\chi^2 = 2,0$ %, что показывает состоятельность построенной теоретической модели.

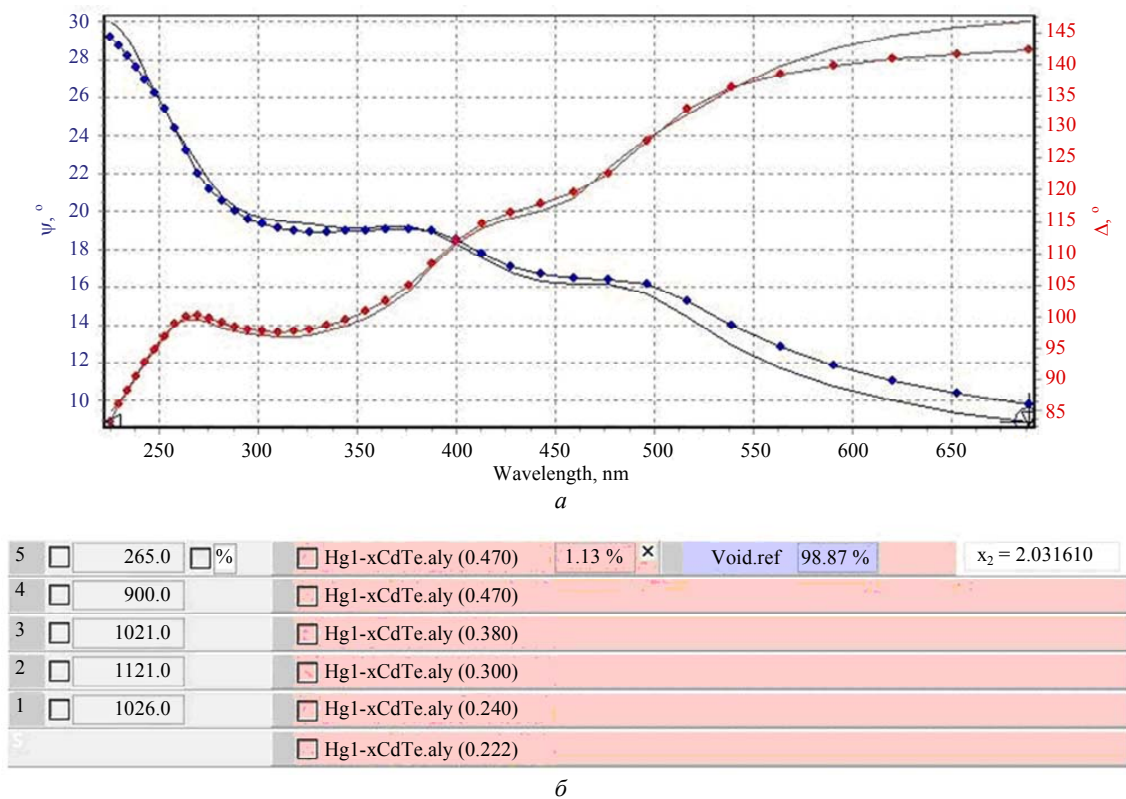


Рис. 6. Зависимость эллипсометрических параметров от длины волны (а) и структура образца ГЭС КРТ (б)

Из результатов моделирования видно, что толщина верхнего варизонного слоя составляет ~2 мкм (а не 0,4 мкм), при этом граница раздела варизонный слой—фоточувствительный слой КРТ гораздо менее резкая, по сравнению с начальными данными о структуре образца (рис. 4). Расчеты позволили уточнить состав фоточувствительного рабочего слоя КРТ на уровне $x = 0,222$ мольных доли. Остальные слои структуры показали одинаковые начальные и конечные характеристики, т. е. изменение их параметров существенного вклада в конечный результат не внесло.

Проведены расчеты коэффициента преломления в рабочем слое КРТ в диапазоне длин волн 220—700 нм. Теоретическая модель (гладкая линия) и измеренная зависимость (точки) представлены на рис. 7.

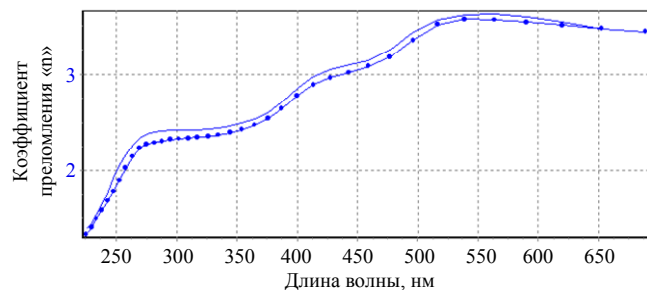


Рис. 7. Зависимость коэффициента преломления от длины волны, измеренная (сплошная линия) и теоретическая кривые (точки)

Значение коэффициента преломления для ГЭС КРТ в рабочем диапазоне длин волн превышает 3,2, что подтверждается другими результатами измерений.

Заключение

Показаны возможности метода спектроскопической эллипсометрии, позволяющей в бесконтактном режиме проводить исследования ряда важнейших параметров полупроводниковых гетероструктур с наноразмерными слоями. У исследуемой структуры КРТ, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии, определен состав, толщина, коэффициент преломления рабочих и вспомогательных слоев.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9.

Литература

1. Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачев А. М. и др. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43.
2. Boltar K. O., Burlakov I. D., Filachev A. M., et al. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2007. V. 16. No. 4. P. 234.
3. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
4. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. — М.: Физматкнига, 2010.

5. Varavin V. S., Vasiliev V. V., Dvoretzky S. A., et al. // Opto-Electron. Rev. 2003. V. 11. No. 3. P. 99.
6. Reddy M., Peterson J. M., Johnson S. M., et al. // J. Electronic Materials. 2009. V. 38.
7. Chang Y., Grein C. H., Zhao J., et al. // J. Appl. Phys. 2006. V. 100. P. 114316–1.
8. Zanatta J. P., Ferret P., Theret G., et al. // Journal of Electronic Materials. 1998. V. 27. No. 6. P. 542.
9. The World Market for Commercial and Dual-Use Military Infrared Imaging and Infrared Thermometry Equipment — Published by Maxtech Int. Inc., 2007.
10. Handbook of ellipsometry, Edited by Harland G. Tompkins Thin Films Materials Science Consultant Chandler, Arizona and Eugene A. Irene Department of Chemistry, University of North Carolina Chapel Hill, North Carolina. — USA: Springer-2005 by William Andrew, Inc.
11. Швец В. А., Спесивцев Е. В. Эллипсометрия: учебно-методическое пособие к лабораторным работам. — Новосибирск: 2013.
12. Jung J., Bork J., Holmgaard T., et al. Ellipsometry (AALBORG UNIVERSITY, Institute of Physics and Nanotechnology).
13. Azzam R. M. A. and Bashara N. M. Ellipsometry and Polarized Light, (North-Holland Publishing company, 1977). ISBN 0-7204-0694-3.
14. Jellison G. E. // Thin Solid Films. 1993. V. 234. P. 416.
15. Jellison G. E. // Thin Solid Films. 1996. V. 290—291. P. 40.

Investigation of the heteroepitaxial CdHgTe structures by spectroscopic ellipsometry

P. S. Skrebneva¹, I. D. Burlakov^{1,2}, and N. I. Iakovleva¹

¹ORION R&P Association
46/2 Entuziastov highway, 111123, Moscow, Russia,
E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automation
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

Received August 11, 2014

This paper concerns reflection spectroscopic ellipsometry. Using these techniques involves no physical contact with the surface of heteroepitaxial structure and does not normally destruct the surface. This is a notable property of a measurement technique on nanoscale. The thickness, composition and the refractive index of the working epitaxial layers of the ternary compound semiconductor structures mercury-cadmium-telluride (MCT) are investigated by spectroscopic ellipsometry.

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

Keywords: CdHgTe, heteroepitaxial structures, photodetector device, molecular beam epitaxy, ellipsometry.

References

1. I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev, et al., Prikladnaya Fizika, No. 2, 43 (2007).
2. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) **16**, 234 (2007).
3. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
4. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2010) [in Russian].
5. V. S. Varavin, V. V. Vasiliev, S. A. Dvoretzky, et al., Opto-Electron. Rev. **11** (3), 99 (2003).
6. M. Reddy, J.M. Peterson, S.M. Johnson, et al., J. Electronic Materials **38**, (2009).
7. Y. Chang, C.H. Grein, J. Zhao, et al., J. Appl. Phys. **100**, 114316–1 (2006).
8. J.P. Zanatta, P. Ferret, G. Theret, et al., Journal of Electronic Materials **27**, 542 (1998).
9. *The World Market for Commercial and Dual-Use Military Infrared Imaging and Infrared Thermometry Equipment* (Published by Maxtech Int. Inc., 2007).
10. *Handbook of Ellipsometry*, Edited by Harland G. Tompkins (Department of Chemistry, University of North Carolina Chapel Hill, North Carolina. – USA: Springer - 2005 by William Andrew, Inc).
11. V. A. Shvets and E. V. Spesivtsev, *Ellipsometry* (Novosibirsk, 2013) [in Russian].
12. Jesper Jung, Jakob Bork, Tobias Holmgaard, Niels Anker Kortbek, *Ellipsometry*, (AALBORG UNIVERSITY, Institute of Physics and Nanotechnology).
13. R. M. A Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light* (North-Holland Publishing Company, 1977), ISBN 0-7204-0694-3.
14. G. E. Jellison Jr., Thin Solid Films **234**, 416 (1993).
15. G. E. Jellison Jr., Thin Solid Films. **290-291**, 40 (1996).