

Таким образом, в данной работе показана возможность создания нового типа ЛСЭ-усилителей. Их характерной особенностью является использование для накачки скрещенного ЕН-убитронного поля. Показано, что такие системы, при прочих равных, могут обладать более высокими уровнями усиления, чем традиционные Н-убитронные усилители.

Авторы выражают благодарность А.В. Лысенко за полезные обсуждения и интерес к работе.

SUMMARY

In the introduced work it has been proposed the new type of the FEL-amplifier based upon the use of the crossed EH-ubitronic pump. The non-linear self-consistent theory of the amplifier with the strong electron beam was created. The additional electric component of the pump leads to the increase of both amplification and efficiency of the laser. The accelerational properties of the EH-ubitronic pump compensate the electron beam power losses partially and can support the resonance in the system. The EH-ubitronic pump with the optimum parameters can compensate electron beam power losses completely. The FEL-amplifier with such pump can work in the isochronic regime and has high amplification and efficiency.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маршалл Т. Лазеры на свободных электронах. - М.: Мир, 1987, 240с.
2. Bekefi G. Electrically pump relativistic free electron wavegenerations. // J. Appl. Phys. 1980. v. 51. №6. p. 3081-3084.
3. Кулиш В.В., Кохманьски С.С. К классической одночастичной теории лазеров на свободных электронах // Acta Physica Polonica. - 1984, v. 66, №6, p. 713-740.
4. Кулиш В.В. Физика лазеров на свободных электронах. Общие положения // Киев, 1990, 192с. - Рукопись представлена Сумским физико-технологическим институтом. Деп. в УкрНИИТИ 05.09.90. №1526 - Ук90.
5. Кулиш В.В. Нелинейная самосогласованная теория лазеров на свободных электронах. Метод исследования // УФЖ. - 1991, т. 36, №9. - С. 1318-1325.
6. Кулиш В.В., Лысенко А.В. Метод усредненного кинетического уравнения и его применение в нелинейных задачах электродинамики плазмы // Физика плазмы. - 1993, т. 19, №2. - С. 216-227.
7. Kulish V.V., Kuleshov S.A., Lysenko A.V. Nonlinear self-consistent theory of superheterodyne and parametric free electron lasers. // The international journal of infrared and millimeter waves. 1993. v. 14, №3, March 1993. p. 82-199.
8. Кулиш В.В., Кулешов С.А. Нелинейная самосогласованная теория лазеров на свободных электронах. Изохронные модели // УФЖ. - 1993, т. 38, №1. - С. 9-19.

Поступила в редколлегию 21 декабря 1994 г.

УДК 536.42:538.975

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ОКИСНЫХ ПЛЕНОК ВАНАДИЯ

Игнатенко В.М., Кшнякина С.И.

Цель данной работы - определение оптических параметров (n , k и d) тонких окисных пленок ванадия высокочувствительными неразрушающими методами: эллипсометрией, отражательно-абсорбционной спектроскопией (ОАС) и спектроскопией поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ), а также изучение кинетики фазового перехода полупроводник-металл в тонких пленках двуокиси ванадия. Трудность решения данной задачи заключается в неоднозначности определения оптических параметров тонких слабопоглощающих пленок одним отдельно взятым методом. Решение этой проблемы для конкретной ситуации - оксидные пленки на ванадиевых подложках - заключается в комплексном применении всех трех методов для исследования одних и тех же образцов. В нашем случае удалось

реализовать высокую чувствительность приборов для получения точных расчетных результатов.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что методы эллипсометрии приводят к неопределенности в определении оптических параметров многослойных слабопоглощающих систем. Уже для двухслойной модели (подложка - тонкая слабопоглощающая пленка) возникает неоднозначность в определении оптических параметров (n , k и d) пленки с помощью широко распространенного метода многоугловой эллипсометрии [1]. При исследовании кинетики структурного фазового перехода полупроводник-металл в тонких пленках двуокиси ванадия [2] стояла задача определения толщин и оптических констант большого числа образцов. При этом было необходимо изучить изменение этих параметров в процессе фазового перехода. Применение Фурье-спектроскопии для исследования спектров ИК-отражения образцов тонких оксидных пленок ванадия позволяет по интенсивности полосы поглощения оценить толщину окисной пленки, которая затем вводится в процедуру расчета оптических констант из эллипсометрических измерений. Ограничения на толщину пленки, полученные из исследования спектров ИК-отражения, позволяют по двухугловым эллипсометрическим измерениям точно определить как толщину, так и оптические константы (n и k) тонкой пленки в видимом диапазоне. Уточненное значение толщины пленки затем используется для точного определения оптических констант в ИК-области спектра. Таким образом, сочетание методов эллипсометрии и Фурье-спектроскопии для исследования одних и тех же образцов позволяют точно определить толщины, а также оптические константы тонких окисных пленок ванадия как в видимом, так и в ИК-диапазонах спектра.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы монокристаллического ванадия размером $15 \times 40 \times 8$ мм шлифовались с одной стороны, а затем полировались вручную на полировальном круге из нержавеющей стали при помощи алмазной пудры. Спектрально-зеркальная поверхность получалась с помощью последующей электрополировки поверхности образца в течение 2-3 мин при напряжении 16В в растворе 25% серной кислоты и 75% этанола для ликвидации царапин и остатков продуктов механической полировки. Наконец, образцы подвергались многократной промывке [3] для удаления всех остатков загрязнений электрополировки. Такая технология позволяет получить гладкие, плоские зеркальные поверхности образцов. Для таких ванадиевых образцов проводились эллипсометрические измерения показателя преломления (n) и поглощения (k). В нашем случае они оказались равными $n=2.65$ и $k=2.56$. Эти же образцы были исследованы с помощью ПЭВ-спектроскопии [4]. Были измерены затухания ПЭВ при распространении вдоль поверхности исследуемого образца и действительная часть эффективного показателя преломления ПЭВ, что позволило определить оптические постоянные исследуемых образцов на частоте генерации CO_2 -лазера ($\nu=943 \text{ см}^{-1}$). Вычисленная по результатам эксперимента диэлектрическая проницаемость оказалась равной $\epsilon = -440 + i 500$. Затем на поверхности каждого образца при нагревании его на воздухе получали слой двуокиси ванадия, что было подтверждено последующими измерениями спектров ИК-отражения. Различные образцы нагревались при температуре порядка 440°C в течение разных промежутков времени, а наблюдаемое различие в их интерференционной окраске свидетельствовало о различных толщинах получившихся окисных пленок. Каждый образец имел однородную интерференционную окраску, что свидетельствовало об однородности оптических свойств исследуемых пленок. Все исследования производились в интервале

температур 24-100° С. Для обеспечения однородности температуры образца в процессе исследования образец крепился на специально сконструированной медной печке, контроль температур производился с помощью отградуированной термпары медь-константан. Погрешность в измерении абсолютного значения температуры не более 1°, а погрешность в измерении и стабильности значения температуры в течение эксперимента не более 0.5°. Эллипсометрические исследования производились с помощью эллипсометра ЛЭФ-3М ($\lambda = 632.8$ нм) при двух углах падения 60° и 70°.

Отражательно-абсорбционная спектроскопия (ОАС) осуществлялась с помощью Фурье-спектрометра Michelson 110 (фирмы BOMEM) с использованием приставки отражения, обеспечивающей угол падения света на образец 56°. Получены спектры отражения в области 400-500 см⁻¹, падающий на образец свет был поляризован в плоскости падения. Анализ спектров отражения позволил оценить значения толщин исследуемых пленок. Были исследованы пленки в интервале толщин от 5.0 до 135 нм. Полученные значения толщин затем были использованы в расчетах для точного определения оптических параметров (n , k и d) из эллипсометрических измерений.

Эти же образцы были исследованы методом спектроскопии поверхностных электромагнитных волн (ПЭВ). Метод спектроскопии ПЭВ [4], распространяющихся вдоль поверхности образца, является чувствительным к изменению оптических постоянных тонких пленок в ИК-диапазоне спектра. Поэтому для определения оптических параметров пленок двуоксида ванадия вне полосы поглощения на частоте генерации СО₂-лазера ($\nu = 943$ см⁻¹) был использован метод ПЭВ. ПЭВ возбуждалась на исследуемом образце излучением СО₂-лазера, сфокусированным на щель между образцом и лезвием. Доходя до края образца, ПЭВ излучается, наблюдается интерференция этого излучения и излучения, проходящего под лезвием. По положениям интерференционных максимумов определяется разность величин волновых векторов объемного излучения и ПЭВ ($Re\ n_x$). Используя значения оптических постоянных ванадия для $\nu = 943$ см⁻¹, измеренные до окисления, вычисляли изменения диэлектрической проницаемости оксидной пленки вне полосы поглощения двуоксида ванадия. Толщины для вычисления брали из эллипсометрических расчетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета оптических постоянных в видимом диапазоне спектра из эллипсометрических измерений были взяты предварительно значения толщин из ОАС-исследований в ИК-диапазоне. Эти значения уточнялись, определялись также оптические константы до и после фазового перехода. Они оказались равными $n=2.82$ и $k=0.3$ при комнатной температуре и $n=2.24$ и $k=0.5$ при температуре 85°С выше точки фазового перехода (70°С). Были рассчитаны также действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости до и после фазового перехода. Учитывая, что квадрат комплексного показателя преломления есть диэлектрическая проницаемость, получаем из наших данных значение $\epsilon = 7.64 + i\ 2.8$ при комнатной температуре и $\epsilon = 4.5 + i\ 3.4$ при 85°С.

Кроме того, анализируя результаты измерений, была получена зависимость толщины пленки при комнатной температуре от толщины пленки при 85°С. По наклону полученной прямой видно, что окисные пленки становятся на 6% толще при фазовом переходе.

Для расчета полученных спектров ИК-отражения были использованы постоянные монокристалла VO₂ [5], которые затем варьировались до совпадения экспериментального и расчетного спектров методом дисперсионного анализа. Для этого достаточно изменить параметры третьего осциллятора с $\omega = 600$, $4\pi\rho = 4.8$ и $\gamma = 0.074$ до $\gamma = 0.175$. Определенная эллипсометрически и по расчетному спектру толщина VO₂

использовалась затем при вычислениях диэлектрических постоянных по ПЭВ-измерениям. Действительная часть диэлектрической проницаемости, определенная методом фазовой спектроскопии ПЭВ на этой частоте, оказалась равной 30 ± 2 , причем значение этой величины одинаково для различных значений толщины пленк VO_2 , как на монокристалле, так и на поликристаллической подложке.

Ниже температуры фазового перехода спектр отражения VO_2 является характерным для диэлектрика колебательным спектром. Выше этой температуры структура спектра отражения исчезает, что свидетельствует о металлизации VO_2 . Изменение интенсивности полосы поглощения объясняется "утоплением" диэлектрического слоя VO_2 с послойной ее "металлизацией".

По измерениям ПЭВ пленка VO_2 ниже точки фазового перехода представляет собой диэлектрик с большим положительным значением диэлектрической проницаемости ϵ , а при температуре выше этого значения величина диэлектрической проницаемости резко падает, что характеризует металлические свойства, причем в высокотемпературной фазе VO_2 представляет собой "плохой металл" с малой проводимостью.

Таким образом, исследования двуоксида ванадия методами эллипсометрии, ОАС- и ПЭВ-спектроскопии позволяют, с одной стороны, избавиться от неопределенности при расчетах оптических параметров (n , k и d) тонких слабопоглощающих пленок, а с другой - определить оптические константы исследуемых пленок как в видимом, так и в ИК-диапазонах спектра, изучить кинетику фазового перехода полупроводник-металл, определить изменение толщины окисной пленки при фазовом переходе.

SUMMARY

This paper reports a study of the kinetics of the VO_2 thin film semiconductor-metal phase transition by methods of ellipsometry (in visible region of spectrum), IR reflection absorption spectroscopy (RAS) and IR spectroscopy of surface electromagnetic waves (surface polaritons) (SEW) in IR region. The measurements were carried out in the temperature range from 24° to 110° C. The optical constants of VO_2 thin films and their modification by phase transition were determined. Our results show that the film thickness increased at phase transition.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Р. Аззам, Н. Башара. Эллипсометрия и поляризованный свет. - М.: Мир, 1981, 593 с.
2. Игнатенко В.М., Кшнякина С.И. Исследование фазового перехода металл-полупроводник в тонких пленках двуоксида ванадия // Современные проблемы прикладной физики. - К.: УМКВО, 1992, с.183-187.
3. M.Fukuma, Preparation of VO_2 thin films and its direct optical bit recording // Apl. Opt. - 1983, 22, 2, p. 265-268.
4. Жижиин Г.Н., Киселев С.А. и др. Интерференция ПЭВ и объемного дифрагированного излучения. Препринт № 26, ИСАН, М., 1988, 15с.
5. Barker A.S., Verleur H.W., Gigenhein H.J., Phus. Rev. Lett. - 1966, V. 17, № 26, P.1286.

Поступила в редколлегия 20 декабря 1994 г.

УДК 681.785.35:519.852.61

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ В ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Забашта Л.А.

Эллипсометрия (метод отражательной поляриметрии) является эффективным методом оптического исследования поверхностных и глубинных процессов, а также изучения оптических свойств как