

Твердотельная електроника

УДК 681.723.28; 620.171.5

О.О. Олійник, канд. техн. наук., Б.А. Циганок

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Політехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Реєстрація модуляційно-поляризаційним методом механічних напружень в поверхневих плівках на твердотільній підкладці

В статті представлена модуляційно-поляризаційна методика реєстрації областей стиснення-розтягнення в плівкових покриттях оптичнопрозорих твердотільних підкладок (як кристалічних так і аморфних). На основі аналізу розподілу механічних напружень в приповерхневому шарі твердотільної підкладки розроблено підхід для розрахунків фізичних параметрів нанесеної плівки. Отримані модифіковані вирази з рівнянь Стоуні, що пов'язують пластичну деформацію твердотільної підкладки з її оптичними параметрами. Закладена в розрахунки можливість реєстрації знакозмінних деформацій дозволила розрахувати механічні напруження в настільки тонких поверхневих плівках, які викликають нехтовно малу пластичну деформацію підкладки. Бібл. 8, рис. 4.

Ключові слова: модуляційно-поляризаційна поляриметрия; поверхневі механічні напруження.

Вступ

Швидкий розвиток технологій вимагає створення різноманітних скануючих вимірювальних методик та їх практичного застосування в промисловій, біоелектронній, фізичній, хімічній, медичній та інших сферах. Скануючі зондові методики дозволяють досліджувати поверхні в нанометровому та субатомному діапазоні, забезпечуючи таким чином отримання інформації про структуру матеріалів, їх механічні, електричні, оптичні, магнітні властивості з наступною її візуалізацією. Інтенсивні дослідження механічних властивостей матеріалів електроніки зіштовхуються з проблемою виникнення та поширення механічних напружень в плівках SiO₂, шарах металізації, шліфованих та полірованих поверхнях, епітаксціальних шаруватих структурах, та інших плівкових структурах. Згадані механічні напруження в поверхневих плівках можуть викликати як зміну внутрішньої структури підкладки так і її пластичну деформацію.

Для розрахунку механічних напружень в шаруватих структурах здебільшого застосовують формули Стоуні (Stoney) [1] у випадку нехтовно малої товщини плівки порівняно з товщиною підкладки; та формули Тимошенко [2] у випадку рівності товщини плівки та підкладки. В основі цих методик лежить використання радіусу кривизни шаруватої структури, вигнутої за рахунок різниці коефіцієнтів теплового розширення плівки і підкладки, а також різниці між температурою осадження плівки та кімнатною температурою. Розрахунки за згаданими формулами не враховують наступні важливі обставини. По-перше вони не враховують зміну напружень в плівці при зміні кривизни підкладки в процесі конденсації. Така зміна викликає зняття механічних напружень, які в свою чергу залежать від величини вигину. По-друге те – що покрита шаром металу підкладка є складною системою, яка для точності розрахунків може описуватись системою диференціальних рівнянь. Можна не враховувати вказані обставини у випадках типових товщин плівки 200 нм і підкладки 0,05 мм, оскільки необхідні поправки розрахунків складають 0,4%. Ряд робіт присвячених вказаній вище тематиці отримали високу відповідність теоретичних розрахунків на основі формул Стоуні та експериментальних результатів [3-5]. В роботі [6] експериментально досліджена кінетика формування власних механічних напружень $\sigma(d)$ в мідних конденсатах на кремнієвих монокристалічних підкладках при різній швидкості напылення. При цьому невирішеними залишаються проблеми, коли металева плівка виконана як однопровідна лінія (контактна доріжка на мікросхемі) або розміри плівки менші за розміри підкладки (контакти для приварювання провідників, пластини конденсаторів в мікросхемах). В таких випадках виникають проблеми вимірювання викривлення поверхні, оскільки їх значення знаходиться на границі чутливості вимірювальної техніки. Додаткові труднощі при вимірюваннях та похибки вносять фазові переходи в структурі шарів в процесі нагрівання чи експлуатації. Наприклад,

Сі при температурі відпалювання вище 800°C проявляє пластичні якості, що вимагає зміни теоретичних розрахунків на основі рівнянь Стоуні та переглядів результатів вимірювань з урахуванням закону Рамберга-Осгуда.

Отже існує гостра необхідність у розробці нових методик вимірювань механічних напружень в плівках на твердотільній підкладці, зокрема на основі поляризаційних ефектів у підкладці. Актуальною є проблема вимірювання механічних напружень в поверхні підкладки після її обробки шліфуванням та поліруванням. Врахування цих обставин дозволяє визначити зміну параметрів підкладки внаслідок нанесення плівкового покриття та встановити величину пластичної деформації, розрахувати параметри нанесеної плівки, в тому числі у випадках, коли плівка є однопровідною лінією по відношенню до підкладки.

Розрахунок механічних напружень в приповерхневій області підкладки та плівці.

Розрахунок внутрішніх механічних напружень ($\sigma_{\text{п.вн}}$) у твердотільній підкладці здійснюється з використанням формул Стоуні (для малих величин деформацій кристалічних підкладок) та закону Рамберга-Осгуда (для розрахунку великих величин деформацій, з урахуванням межі міцності та пластичних властивостей підкладки) [1,2]:

- для механічних напружень в плівці $\sigma_{\text{п.вн}}$ [Па]:

$$\sigma_{\text{п.вн}} = \frac{E}{3(1-\nu)r^2} \cdot \frac{h^2}{t} f \quad (1)$$

- для механічних напружень в кристалічній підкладці $\sigma_{\text{підкл.вн}}$ [Па]:

$$\sigma_{\text{підкл.вн}} = \frac{2E}{(1-\nu)r^2} \cdot \left(x - \frac{2}{3}h\right) f \quad (2)$$

- для розрахунків деформації ε еластичної підкладки:

$$\varepsilon = \begin{cases} \sigma / E, & \sigma \leq 0, \\ \sigma / E + \alpha_0 (\sigma_0 / E)^n, & \sigma > 0, \end{cases} \quad (3)$$

де E та ν - модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона підкладки відповідно; h , r - товщина і радіус

кола, дотичного до профілю геометричної деформації підкладки; t - товщина плівки; x - поточна координата, яка відраховується від границі розподілу середовищ; f - деформація підкладки в результаті нанесення плівки, σ - механічне напруження, σ_0 - межа текучості, α_0 та n - константи зчеплення шарів.

Необхідними умовами для використання формул (1)-(2) є ізотропність механічних напружень і рівність модулів Юнга плівки і підкладки. При цьому вважається, що деформація підкладки спричиняється дією згинаючого моменту, котрий створюється внутрішніми механічними напруженнями плівки. У випадку, коли плівка знаходиться у рівноважному стані, відповідно, вона не створює згинаючий момент. За формулою (1) можна визначити лише інтегральну величину внутрішніх механічних напружень у плівці. Це обмежує застосування формул Стоуні для визначення внутрішніх напружень в системі підкладка-плівка. Формула (3) дозволяє проводити теоретичні розрахунки механічних напружень у металевих плівках та аморфних речовинах, коли стан рівноваги досягається не параболічною чи колоподібною деформацією підкладки, а зміною її внутрішньої структури вздовж однієї з її координат разом зі зміною геометричних розмірів. З урахуванням цих зауваження формули (1-3) можливо застосовувати практично до всіх матеріалів електроніки.

Для отримання більш точних формул розрахунку внутрішніх механічних напружень в системі плівка-підкладка доцільно скористатись методом початкових механічних напружень. Він базується на припущенні, що на жорстко закріпленій підкладці сформована плівка з початковими механічними напруженнями $\sigma_{\text{п.вн}}$, (рис.1а). Після звільнення підкладки відбувається перерозподіл початкових механічних напружень $\sigma_{\text{пн.вн}}$, що рівнозначно додатковому прикладанню до системи плівка-підкладка механічних напружень від осьових сил $\sigma_{\text{ос}}$ (рис.1б) та механічних напружень викликаних згинаючими моментами σ_M . В результаті складається зрівноважена кінцева еюра внутрішніх механічних напружень $\sigma_{\text{вн}}$ (рис.1в):

$$\sigma_{\text{вн}} = \sigma_{\text{пн.вн}} + \sigma_{\text{ос}} + \sigma_M \quad (4)$$

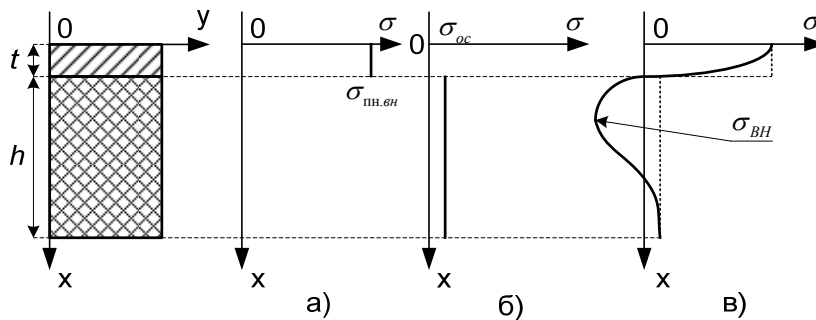


Рис. 1. Графічний опис процесу утворення внутрішніх механічних напружень: а) система плівка-підкладка з початковими механічними напруженнями в плівці; б) епюра механічного напруження від осьових сил; в) кінцева епюра внутрішніх механічних напружень з урахуванням моментів згинаючих сил

Отримані наступні залежності для знаходження механічних напружень σ_{oc} та σ_M , які визначаються з умов рівноваги системи і розраховуються по формулам:

$$\sigma_{oc} = -\frac{1}{h} \int_0^t \sigma_{пн.вн} dx \quad (5)$$

$$\sigma_M = -\frac{12}{h^3} \left(\frac{h}{2} - X\right) \left(\frac{h}{2} - x\right) \int_0^t \sigma_{пн.вн} dx \quad (6)$$

де $X = \frac{\int_0^t \sigma_{пн.вн} x dx}{\int_0^t \sigma_{пн.вн} dx}$ - координати центру ваги епюр початкових механічних напружень.

Деформацію підкладки можна знайти, використавши відому з теорії пружності залежність:

$$f = 6Mr^2(1-\nu)/Eh^3$$

Беручи до уваги, що згинаючий момент рівний:

$$M = \left(\frac{h}{2} - X\right) \int_0^t \sigma_{пн.вн} dx,$$

отримуємо наступний вираз для деформації підкладки:

$$f = \frac{6Mr^2(1-\nu)}{Eh^3} \left(\frac{h}{2} - X\right) \int_0^t \sigma_{пн.вн} dx \quad (7)$$

З отриманих залежностей впливає, що при точному розрахунку внутрішніх механічних напружень виходячи з величини деформації підкладки проміжним етапом є визначення початкових напружень за формулою (7), після чого знаючи $\sigma_{пн.вн}$ розраховуються σ_{oc} , σ_M та σ_{BH} . Описані методи розрахунків внутрішніх механічних напружень можуть бути неприйнятні у випадках, коли не всі параметри тонкої плівки та під-

кладки відомі, а також коли неможливо виміряти, або розрахувати деформацію матеріалів. В таких випадках, методи модуляційної поляриметрії дозволяють безпосередньо вимірювати розподіл внутрішніх механічних напружень в твердотільних підкладках для безпосереднього вимірювання $\sigma_{пн.вн}$.

Показано, що висока точність вимірювання та виявна здатність методу модуляції стану поляризації дозволяє на нинішньому етапі реєструвати відносну зміну показника заломлення на рівні $\Delta n/n = 10^{-10}$ (при довжині оптичного шляху 0,01 м) [7]. Оскільки різниця фаз δ між ортогональними компонентами лінійно поляризованого світла $n_{||}$ та n_{\perp} , що характеризують оптичну анізотропію $\Delta n = n_{||} - n_{\perp}$ знаходиться у функціональній залежності від довжини хвилі випромінювання в підкладці λ , константи фотопружності C (табличні значення, та методи розрахунку та вимірювання приведені у [8]) та оптичного шляху випромінювання у зразку d визначаються за співвідношеннями:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} C \sigma_{пн.вн} d \approx \frac{2\pi}{\lambda} d (n_{||} - n_{\perp}) \quad (8)$$

Взявши за точку відліку σ_{oc} в координатах $x=h$, та прийнявши значення механічних напружень у ній за нуль, методом растрового сканування стає можливим не тільки теоретично розрахувати, а й експериментально виміряти розподіл механічних напружень у підкладці. Описаний метод дає тим меншу похибку, чим менша деформація підкладки, а отже – більше підходить для досліджень надмалих деформацій та механічних напружень у випадках, коли металізація поверхні не викликає викривлення поверхні підкладки або нею можна знехтувати. Вирахувавши з формули (4) $\sigma_{пн.вн}$, та окремо виміря-

вши σ_{oc} , з використанням формул (1-7) стає можливим визначення в абсолютних одиницях амплітудного значення та фази механічних напружень, а також розрахунок деформації, яку вони спричиняють. При цьому має зберігатись рівність:

$$\int_t^{t+h} \sigma_{BH} dx = h \sigma_{пн.вн.} \quad (9)$$

Оскільки лазерний промінь на практиці вдається стиснути до діаметру 3λ , то, вимірявши розподіл оптичної анізотропії пропонується розрахувати з формули (8) механічні напруження у підкладці – $\sigma_{підкл.вн} = \sigma_{BH}$, що дозволяє не лише розрахувати механічні напруження в металевій плівці, але й безпосередньо вимірювати їх:

$$\begin{aligned} |\sigma_{п.вн.}| = |\sigma_{підкл.вн.}| &= \frac{1}{2(t+h)} \int_0^{t+h} \sigma_{BH} dx = \\ &= \frac{1}{2(t+h)} \int_0^{t+h} \frac{\delta(x)\lambda}{2\pi Cd(x)} dx \end{aligned} \quad (10)$$

Отриманий вираз (10) враховує можливість функціональної залежності від координати як фазового зсуву $\delta(x)$ так і оптичного шляху $d(x)$.

Деформація підкладки з плівкою з врахуванням отриманих раніше виразів (7,8), розраховується наступним чином:

$$f = \frac{3Mr^2(1-\nu)}{Eh^3(t+h)} \left(\frac{t+h}{2} - X \right) \int_0^{t+h} \frac{\delta(x)\lambda}{2\pi Cd(x)} dx \quad (11)$$

Функціональна схема установки для вимірювань внутрішніх механічних напружень в твердотільній підкладці

Модуляційна поляриметрия полягає у вимірюванні зміни лінійного стану поляризації у циркулярний в прямопропорційній залежності від величини зміни показника заломлення [7]. Блок-схема вимірювальної установки представлена на рис. 3, де 1 – лазер, 2 – поляризатор, 3 – чвертьхвильова фазова пластинка, 4 та 7 – лінзи, 5 – оптична система для формування апертури лазерного променя, 6 – зразок, 8 – фотопружний модулятор (частота модуляції 50 кГц, глибина модуляції 90%), 9 – аналізатор, 10 – фотоприймач, 11 – селективний вольтметр, 12 – синхронно-фазовий детектор, 13 – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), 14 – персональний комп'ютер (ПК), 16 – двокоординатна позиційна система.

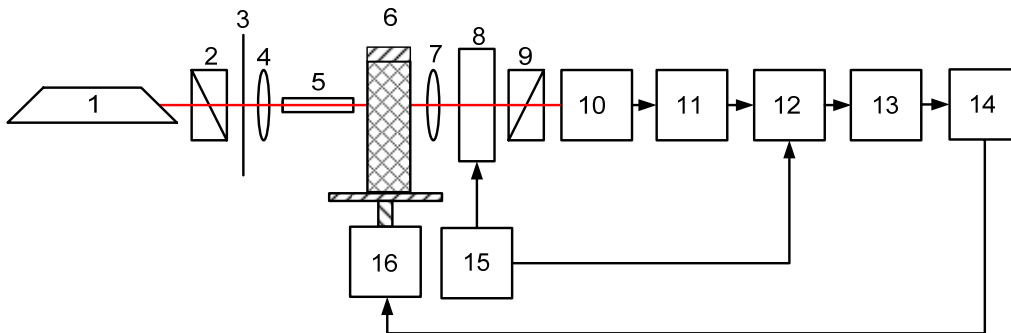


Рис. 3. Блок-схема установки для вимірювання оптичної анізотропії оптичнопрозорих матеріалів

Принцип вимірювання полягає в реєстрації зміни одного з параметрів вектора Стокса випромінювання за допомогою селективного нановольтметра та синхронно-фазового детектору, які дозволяють вимірювати різницю між фазами опорного та продетектованого сигналів до величини $\delta_{\min} = 2\pi \cdot 10^{-5}$ рад. Методика вимірювання за допомогою модуляційної поляриметрії докладно описана в [7].

Проведений теоретичний аналіз та попередні експериментальні дані підтверджують той факт, що механічні параметри системи – «металева плівка – твердотільна підкладка», має спільні риси з системами плівка-твердотільна підкладка [5,7], де плівкою може виступати не лише металеве покриття, а й «порушений» шар в процесі технологічної обробки матеріалів електроніки та інші плівкові структури. На рис. 4 представлені експериментальні результати вимірювання механічних напружень в приповерхнево-

му шарі полірованого зразку з кристалічного кварцу, що з сумарною похибкою 10% дозволяє розрахувати розподіл механічних напружень, викликаних «порушенням» шаром, який виник в процесі шліфовки та полірування.

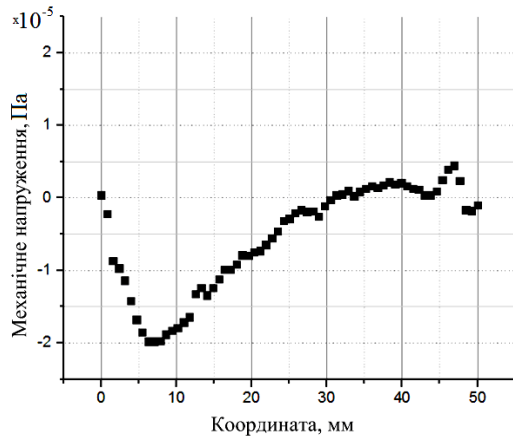


Рис. 4. Графік знакозмінного розподілу механічних напружень в поверхневій плівці на підкладці з кристалічного кварцу

Форма графіку розподілу механічних напружень в приповерхневому шарі показує, що тонка плівка може викликати і знакозмінну силу. В такому випадку для використання формул (1-11) при розрахунку пластичних деформації необхідно розбивати весь діапазон на ділянки, та апроксимувати їх сферичними або параболічними функціями.

Висновки

Використання методу модуляції стану поляризації дозволило безпосередньо виміряти розподіл механічних напружень в приповерхневому шарі твердотільної підкладки, що підтверджує отримані теоретичні вирази для розрахунку знакозмінних механічних напружень в поверхневій плівці. На основі того, що розподіл механічних напружень в підкладці не враховується опосередковано як зазвичай, а вимірюється – описана

УДК 681.723.28; 620.171.5

О.О. Олейник, канд. техн. наук, Б.А. Цыганок

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Регистрация модуляционно-поляризационным методом механических напряжений в поверхностных пленках на твердотельной подложке

В статье представлена модуляционно-поляризационная методика регистрации областей сжатия-растяжения в пленочных покрытиях оптически прозрачных твердотельных подложек

методика дозволяє відійти від обмежень ідеальності структури плівки та підкладки. Це дозволяє досліджувати реальні шаруваті структури. Отримані вирази є достатніми для розрахунку механічних напружень у більшості матеріалів електроніки, у яких товщина підкладки перевищує 1 мкм; сумарна похибка вимірювання не перевищує 20%. З проведених досліджень випливає також, що перспективним є вимірювання механічних напружень в шаруватих структурах на основі аналізу відбитого від поверхні випромінювання.

Список літературних джерел

1. Stoney G.S. // Proc. Royal Soc. Ser. A. 1900. V. 82. NA553. P. 172-175.
2. Timoshenko S.P. // J. Optical Soc. of America and Review of Scientific Instruments. 1925. V. 11. N 3. P. 233-255.
3. Singer P. Film Stress and How to Measure it // Semiconductor International.- 1992.- No10.- P. 54-58.
4. Ayvazyan G.E. Anisotropic Warpage of Wafers with Anodized Porous Silicon Layers // Phys. Stat. Sol. (a).- 1999. - V. 175.- P.7-83.
5. Сергеев В. С., Кузнецов О. А. и др. Напряжения и деформации в элементах микросхем.-М.: Радио и связь, 1994.- 88с.
6. Юзевич В. М. Механічні напруження в тонких плівках міді на монокристалічному кремнії / В. М. Юзевич, Б. П. Коман // Металлофизика и новейшие технологии. - 2003. - 25, № 6. - С. 747-761.
7. Б. К. Сердега. Модуляційна поляриметрия // К.: Наук. Думка. – 2011. – с. 238.
8. S. Yu. Davydov and S. K. Tikhonov. Photoelasticity and quadratic permittivity of wide-gap semiconductors // Semiconductors. – 1997.- 31, № 7, 1997, pp. 698-699.

Поступила в редакцию 21 июля 2015 г.

(как кристаллических, так и аморфных). На основе анализа распределения механических напряжений в приповерхностном слое твердотельной подложки разработан подход для расчетов физических параметров нанесенной пленки. Получены модифицированные выражения из уравнений Стоуни, связывающие пластическую деформацию твердотельной подложки с ее оптическими параметрами. Заложена в расчеты возможность регистрации знакопеременных деформаций позволила рассчитать механические напряжения в столь тонких поверхностных пленках, которые вызывают пренебрежимо малую пластическую деформацию подложки. Библ. 8, рис. 4.

Ключевые слова: модуляционно-поляризационная поляриметрия, поверхностные механические напряжения.

UDC 681.723.28; 620.171.5

O. Oliinyk, Ph.D., B. Tsyganok

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
03056 Ukraine, Kyiv, Polytechnique str., 16, academic building 12.

Registration of mechanical stresses in the films on a solid state substrate by polarization-modulation technique

The article presents a modulation-polarization technique of stress-strain registration in film coatings of optically transparent solid substrates (both crystalline and amorphous). On the basis of the mechanical stress distribution in the surface layer of the solid substrate an approach is developed for calculation of physical parameters of deposited films. The resulting modified expressions of Stony equations that link plastic deformation of solid substrate with its optical parameters are obtained. Possibility of reverse deformations registration laid in calculations allowed to calculate the mechanical stresses in such a thin surface film that cause negligibly small plastic deformation of the substrate. References 8, Fig. 4.

Keywords: polarization-modulation polarimetry; surface mechanical stresses.

References

1. Stoney, G. S. (1990). Proc. Royal Soc. Ser. A. V. 82. NA553, pp. 172-175.
2. Timoshenko, S. P. (1925). J. Optical Soc. of America and Review of Scientific Instruments. Vol. 11, № 3. pp. 233-255.
3. Singer, P. (1992). Film Stress and How to Measure it'. Semiconductor International. № 10. pp. 54-58.
4. Ayvazyan, G. E. (1999). 'Anisotropic Warpage of Wafers with Anodized Porous Silicon Layers. Phys. Stat. Sol. (a). Vol. 175. pp.7-83.
5. Sergeev, V. S., Kuznetsov, O. A. (1994). Stresses and deformations in IC elements. Moscow: Radio and Communication.
6. Yuzeich, B. M. (2003). Mechanical stresses in thin copper films on the monocrystal Si. Metal physics and new technologies. Vol. 25, № 6. pp. 747-761.
7. Serdega, B. K. (2011). Modulation polarimetry. Kyiv: Naukova Dumka.
8. Davydov, S. Yu. and Tikhonov, S. K. (1997). Photoelasticity and quadratic permittivity of wide-gap semiconductors. Semiconductors. Vol. 31, № 7. pp. 698-699.