

ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ В ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЯХ

УДК 535.51 : 535.361.2

Н. В. Сопинский  
(Киев, Украина)

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭФФЕКТА ФОТОЛЕГИРОВАНИЯ  
В ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ СТРУКТУРЕ  $PbI_2-Cu$

Методом многоугловой эллипсометрии исследованы профили оптических постоянных пленок — продуктов фотостимулированного взаимодействия — в структурах  $PbI_2-Cu$  с исходной объемной долей металла в них:  $q_0 = 0,04-0,15$ . Установлено, что характер этих профилей определяется распределением меди по толщине, коагулирующей в металлические кластеры в объеме и на поверхности пленки  $PbI_2$ , а последнее зависит от доли металла в структуре, экспозиции и интенсивности облучения. Результаты эллипсометрического моделирования подтверждены результатами совместных масс-спектрометрических и эллипсометрических измерений, с помощью которых получен реальный профиль распределения концентрации меди в пленке  $PbI_2(Cu)$ .

**Введение.** Изучение эффекта фотостимулированного взаимодействия в структурах полупроводник — металл (эффекта фотолегирования) имеет научный и практический интерес, поскольку, с одной стороны, является важной составной частью фундаментальной физики низкоэнергетического радиационного влияния на тонкослойные структуры и примеси в твердых телах, а с другой — на основе этого эффекта созданы регистрирующие среды, используемые в качестве высокоразрешающего неорганического фоторезиста в электронной технике, оплотехнике, среды для голографии, записи информации и т. д. [1, 2].

Суть этого эффекта состоит в том, что под воздействием света в тонкопленочных структурах происходит проникновение металла в полупроводник и образование новой фазы, физико-химические свойства которой существенно отличаются от свойств исходных компонент. Данные о концентрационном профиле легирования могут дать полезную информацию для установления механизма явления и важны также для технологических применений. Такие исследования выполнены в структурах на основе аморфных пленок халькогенидных стеклообразных полупроводников, в том числе эллипсометрическим методом [3, 4].

В последнее время предложена конкурентоспособная бессеребряная регистрирующая среда на основе пленок  $PbI_2$  и меди [5]. Однако до настоящего времени отсутствовали данные о концентрационном профиле металла в поликристаллических пленках галогенидов металлов. Настоящая работа призвана хотя бы частично восполнить этот пробел.

**Приготовление образцов.** Исходные образцы готовились с помощью вакуумного термического напыления ( $P = 5 \cdot 10^{-3}$  Па) пленок  $Cu$  и  $PbI_2$  на оптически полированные подложки из стекла К-8. Контроль скорости осаждения и толщины пленок в процессе осаждения осуществлялся кварцевым

измерителем КИТ-1. Геометрические толщины исходных и экспонированных структур измерялись на интерферометре МИИ-4. Толщина пленок  $PbI_2$  составляла 40—70 нм, пленок  $Cu$  — 1,5—12 нм.

Экспонирование структур осуществлялось светом с длиной волны  $\lambda = 436$  нм (из области собственного поглощения иодида свинца) интенсивностью  $(J) 2 \cdot 10^{-3}$  и  $7 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup>. Контроль процесса экспонирования велся фотометрически (отслеживались коэффициенты отражения  $R$  и пропускания  $T$  на длине волны облучения).

Эллипсометрические измерения и их обработка. Поляризационные углы экспонированных структур  $\Delta$  и  $\Psi$  определялись на эллипсометре ЛЭФ-3М-1 ( $\lambda = 632,8$  нм) по четырехзонной методике при восьми углах падения света в интервале  $\varphi_0 = 45 \div 80^\circ$ . Результаты измерений анализировались с помощью реализованной на алгоритмическом языке Фортран-77 программы, минимизирующей целевую функцию [6]:

$$G(\mathbf{b}) = \sum_{i=1}^M \left[ (\Psi_i^m - \Psi_i^c(\mathbf{b}, \varphi_{0i}))^2 + (\Delta_i^m - \Delta_i^c(\mathbf{b}, \varphi_{0i}))^2 \right], \quad (1)$$

где  $\Psi_i^m, \Delta_i^m$  — поляризационные углы, измеренные при углах падения  $\varphi_{0i}$ ;  $\Psi_i^c, \Delta_i^c$  — углы, рассчитанные по основному уравнению эллипсометрии [6, 7] в рамках заданной модели, параметры которой являются компонентами вектора  $\mathbf{b}$ ;  $M$  — количество углов падения.

Для вычисления  $\Psi_i^c, \Delta_i^c$  использовался матричный метод Абелеса — расчета амплитудных коэффициентов отражения для изотропных многослойных отражающих систем в методологии, изложенной в [7, гл. V]. Полные матрицы слоистой системы, через компоненты которых выражаются  $\Psi_i^c, \Delta_i^c$ , представляют собой произведение матриц отдельных слоев, образующих систему:

$$M_{s,p}(0, z_0) = M_{s,p}(0, z_1)M_{s,p}(z_1, z_2) \dots M_{s,p}(z_{n-1}, z_0) \quad (2)$$

(здесь  $z = 0$  соответствует нижней границе слоистой системы, а  $z = z_0$  — ее верхней границе).

При разработке программы мы исходили из того, что подход, использующий описание зависимости комплексной диэлектрической постоянной от толщины

$$\varepsilon = (n - i\kappa)^2 = n^2 - \kappa^2 - i2n\kappa \quad (3)$$

( $n$  и  $\kappa$  — показатели преломления и поглощения) различными функциями с последующим определением той из них, которая обеспечивает наилучшую минимизацию  $G(\mathbf{b})$ , требует численного вычисления интегралов матриц неоднородных слоев, значительно усложняет и замедляет вычисление полной матрицы отражающей системы [8]. Другой подход состоит в том, что любой профиль можно описать ломаной кривой, состоящей из линейных отрезков. Во многих практических случаях неоднородность распределения  $\varepsilon(z)$  является настолько резкой, что такой неоднородный слой может быть разделен на два однородных слоя [3].

Исходя из этого, программа моделирует исследуемый объект набором однородных и/или линейно-неоднородных слоев, находящихся на подложке. В пределах линейно-неоднородного слоя зависимость диэлектрической постоянной от координаты  $z$  имеет вид:

$$\varepsilon(z) = \varepsilon_n - (\varepsilon_n - \varepsilon_b)(z - z_n)/h, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_n, \varepsilon_b$  — значения диэлектрической постоянной на нижней ( $z = z_n$ ) и верхней ( $z = z_b$ ) границах неоднородного слоя;  $h = z_b - z_n$  — толщина слоя. В программе моделируется также состояние границ раздела между слоями и между нижним слоем и подложкой. Граница раздела выбирается или резкой

(на границе имеет место прыжок  $\epsilon$ ), или нерезкой (прыжок  $\epsilon$  на границе отсутствует).

Для вычисления матрицы линейного слоя он разбивается на тонкие суб-слои толщиной  $h_c$ : однородные либо линейно-неоднородные. Матрица линейного слоя находится перемножением матриц однородных либо линейных суб-слоев. Для тонких линейных субслоев интегралы — компоненты матрицы — во втором приближении по параметру  $h_c/\lambda_0$  могут быть вычислены в явном виде [8], что и было нами сделано.

Минимизация целевой функции  $G(b)$  осуществлялась методом Нелдера — Мида [9]. Критериями адекватности моделей, кроме глубины абсолютного минимума целевой функции  $G_{\min}$ , служили также такие факторы, как значения толщин слоев экспонированной структуры, которые должны соответствовать установленным интерферометрически, физичность получаемых в модели оптических параметров, чувствительность  $G(b)$  к изменению оптических параметров.

Результаты эллипсометрического моделирования. Экспонированные светом с  $J = 2 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup> до момента исчерпания пленки Си структуры в первую очередь описывались моделью однородного изотропного слоя. Для структур с  $q_0 \leq 0,1$  эта модель дает абсолютные минимумы целевой функции (1) величиной всего в несколько сотых, при этом толщины, найденные из эллипсометрических данных, совпадают с толщинами  $h_i$ , полученными из интерферометрических измерений на МИИ-4. Это указывает на полную адекватность этой модели данным образцам. Как пример приведем данные моделирования для структуры с  $q_0 = 0,08$  (экспозиция  $H$  в этом случае составила  $0,17$  Дж/см<sup>2</sup>):  $G_{\min} = 0,012$  при  $n = 2,42$ ,  $\kappa = 0,39$ ,  $h = 53$  нм ( $h_i = 53$  нм). Дополнительное моделирование линейно-неоднородным слоем и двумя однородными слоями подтверждает однородность экспонированной структуры: оптические параметры нижней и верхней границ слоя в линейной модели приближаются друг к другу, в двухслойной модели также наблюдается выравнивание оптических постоянных обоих слоев.

Оптические постоянные полученного в результате экспонирования однородной пленки продукта фотостимулированного взаимодействия отличаются от оптических постоянных пленки  $PbI_2$  ( $n \cong 2,7$ ,  $\kappa = 0$ ) в первую очередь наличием поглощения при  $\lambda = 632,8$  нм. Они близки к оптическим постоянным керметных пленок  $PbI_2(Cu)$ , получаемых одновременным осаждением на подложку Си и  $PbI_2$  и содержащих вкрапления меди нанометровых размеров в матрице  $PbI_2$ , которые и обуславливают возникновение поглощения в области прозрачности  $PbI_2$  [10]. Это позволило предположить, что полученная пленка продукта представляет собой пленку  $PbI_2$  с вкраплениями металлической меди в нем. Исследования спектральных зависимостей оптических постоянных таких слоев [11] подтвердили это предположение, в [11] установлено также, что в металлические кластеры коагулирует значительная часть диффундировавших в пленку  $PbI_2$  атомов меди.

Модель однородного слоя для образцов с  $q_0 \geq 0,1$ , экспонированных при  $J = 2 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup> до момента исчерпания медной пленки, дает уже несколько большие значения абсолютного минимума  $G_{\min}$  (около 0,1), причем полученные значения  $h$  на 15—25 нм больше  $h_i$ . Например, для образца с  $q_0 = 0,12$  (при  $H = 0,41$  Дж/см<sup>2</sup>)  $G_{\min} = 0,068$  при  $n = 2,40$ ,  $\kappa = 0,35$ ,  $h = 72,5$  нм, тогда как  $h_i = 55$  нм. Для диагностирования причины такого положения дел проводилось сравнение различных моделей, при этом значение толщины моделированной структуры бралось фиксированным и равным  $h_i$ . Рассмотрим это на последнем примере. При задании толщины  $h = h_i = 55$  нм для «однородной» модели  $G = 0,197$  при  $n = 2,364$ ,  $\kappa = 0,63$ . Модель линейно-неоднородного слоя вдвое уменьшает значение  $G$ :  $G = 0,09$  при  $\epsilon_{1n} = 6,55$ ,  $\epsilon_{2n} = 3,66$ ,  $\epsilon_{1b} = 4,79$ ,  $\epsilon_{2b} = 1,33$  ( $n_n = 2,65$ ,  $\kappa_n = 0,69$ ,  $n_b = 2,21$ ,  $\kappa_b = 0,30$ ). Еще меньшее значение  $G$  дает модель двух однородных слоев:  $G = 0,013$  при  $n_1 = 2,6$ ,  $\kappa_1 = 0,3$ ,  $h_1 = 52$  нм,  $n_2 = 0,29$ ,  $\kappa_2 = 0,68$ ,  $h_2 = 3,0$  нм (индекс 1

относится к нижнему, а индекс 2 — к верхнему слою). Таким образом, две последние модели указывают на то, что этой экспонированной структуре присуща неоднородность по толщине, приводящая либо к плавному уменьшению показателей преломления и поглощения от нижней к верхней части, либо к значительному уменьшению  $n$  и увеличению  $\kappa$  в довольно тонком приповерхностном слое структуры. Учитывая значительно меньшую величину  $G$  в двухслойной модели, преимущество следует отдать последнему варианту.

Оптические постоянные верхнего слоя (очень низкие (несколько десятых) значения показателя преломления и приблизительно такие же значения показателя поглощения) дают как низкие значения мнимой части диэлектрической постоянной  $\epsilon_2$  (в данном случае  $\epsilon_2 = 0,39$ ), так и низкие (и даже отрицательные, в данном случае  $\epsilon_1 = -0,38$ ) значения действительной части диэлектрической постоянной  $\epsilon_1$  в верхнем слое. Это позволяет интерпретировать верхний слой как шероховатый слой с большим содержанием металлической меди [12]. Дальнейшее экспонирование образцов из этой серии (с  $q_0 = 0,12$ ) светом с  $J = 2 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup> ведет к еще худшему согласованию с однослойной моделью и, как показывают результаты моделирования, к увеличению толщины верхнего обогащенного медью слоя. Таким образом, после фоторастворения металлической пленки идет процесс перераспределения меди в слое PbI<sub>2</sub>(Cu), который, как показывает сравнение экспозиций, протекает значительно медленнее, чем процесс собственно растворения металла.

Результаты моделирования экспонированных при  $J = 7 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> структур свидетельствуют, что с уменьшением интенсивности облучения образование приповерхностного слоя протекает значительно медленнее. Для примера рассмотрим образец из серии с  $q_0 = 0,12$  при  $H = 0,84$  Дж/см<sup>2</sup> (эта экспозиция вдвое больше той, которая необходима для полного растворения медной пленки). В отличие от предыдущего в этом случае в модели однородного слоя абсолютный минимум  $G$  получаем при нефизичных значениях  $n$  и  $\kappa$  и значениях толщины, близких к нулю, тогда как  $h_i = 55$  нм. При  $h = h_i$  в модели однородного слоя  $G = 2,38$  при  $n = 1,98$ ,  $\kappa = 0,445$ . Модель линейного слоя втрое уменьшает величину  $G$ : при  $h = 55$  нм минимум  $G = 0,856$  при  $\epsilon_{1n} = 0,924$ ,  $\epsilon_{2n} = 4,70$ ,  $\epsilon_{1b} = 7,57$ ,  $\epsilon_{2b} = 1,77$  ( $n_n = 1,69$ ,  $\kappa_n = 1,39$ ,  $n_b = 2,77$ ,  $\kappa_b = 0,32$ ). Еще более глубокий минимум дает модель двух однородных слоев:  $G = 0,0405$  при  $n_1 = 3,12$ ,  $\kappa_1 = 0,85$ ,  $h_1 = 25$  нм,  $n_2 = 1,39$ ,  $\kappa_2 = 1,975$ ,  $h_2 = 31$  нм. Таким образом, количество меди, находящейся в PbI<sub>2</sub> в виде медных кластеров, больше в приподложечной и меньше в приповерхностной частях пленки.

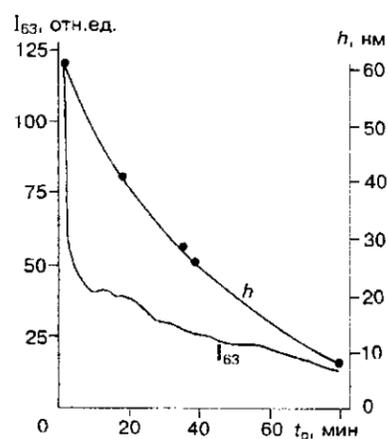
Из полученных результатов следует вывод о том, что образование металлических вкраплений внутри фотолегированного слоя PbI<sub>2</sub> имеет большую вероятность при экспонировании структур светом с меньшими интенсивностями, а условия движения меди в дисперсном состоянии через пленку PbI<sub>2</sub> и образование металлических кластеров на ее поверхности являются более благоприятными при экспонировании структур светом с большими интенсивностями.

Результаты совместных эллипсометрических и масс-спектрометрических исследований. Для проверки достоверности полученных эллипсометрических результатов проведены одновременные исследования экспонированных структур методами эллипсометрии и вторично-ионной масс-спектрометрии. Структуры для этих измерений осаждались на оптически полированные шайбы из нержавеющей стали. Эффективные оптические постоянные таких подложек при  $\lambda = 632,8$  нм имели значения  $n \approx 2,2$ ,  $\kappa \approx 3,6$ . Эллипсометрическое моделирование находящихся на таких подложках структур дает результаты, аналогичные результатам для структур на стеклянных подложках, разница состоит лишь в больших значениях целевой функции, что может быть обусловлено худшим качеством подложки (большая шероховатость, наличие нарушенного слоя и окисной пленки).

Масс-спектрометрические измерения проводились в масс-спектрометре МС-7201М. Распыление осуществлялось ионами  $\text{Ag}^+$  с энергиями 1 кэВ. Плотность потока ионов выбиралась малой, чтобы избежать влияния потока на концентрационный профиль меди. Уменьшение плотности потока достигалось дефокусированием пучка, одновременно это улучшало однородность распыления образца по площади. В процессе распыления экспонированной структуры регистрировались амплитудные значения тока вторичных ионов  $^{63}\text{Cu}^+$  ( $I_{63}$ ). В качестве внутреннего стандарта использовались токи вторичных ионов  $^{56}\text{Fe}^+$ ,  $^{27}\text{Al}^+$ . Для сравнения исследовалось травление отдельных пленок меди и  $\text{PbI}_2$ . В последнем случае регистрировался ток ионов  $^{127}\text{I}^+$ , величина этого тока была много меньше величины тока ионов  $^{63}\text{Cu}^+$ , пленка  $\text{PbI}_2$  толщиной 60 нм распылялась примерно за минуту, что давало скорость распыления  $\sim 1$  нм/с. Ток  $I_{63}$  при распылении медной пленки был большим, чем при распылении фотолегированного  $\text{PbI}_2$ .

Рассмотрим результаты эллипсометрического моделирования нанесенной на стальную подложку структуры с  $q_0 = 0,09$ , экспонированной при  $J = 7 \cdot 10^{-4}$  Вт/см<sup>2</sup> до  $H = 1,8$  Дж/см<sup>2</sup>. Модель однородного слоя дает абсолютный минимум  $G_{\text{min}} = 0,995$  при  $h = 87$  нм,  $n = 2,103$ ,  $\kappa = 0,346$ , тогда как  $h_i = 60$  нм. При  $h = h_i = 60$  нм эта модель дает минимум  $G = 14,96$  при  $n = 2,586$ ,  $\kappa = 0,352$ . Модель линейно-неоднородного слоя лишь несколько улучшает целевую функцию, давая для  $\epsilon_{1b}$ ,  $\epsilon_{2b}$ ,  $n_n$  и  $\kappa_b$  более низкие значения, нежели для  $\epsilon_{1n}$ ,  $\epsilon_{2n}$ ,  $n_n$ ,  $\kappa_n$  соответственно:  $G = 12,14$  при  $\epsilon_{1n} = 9,06$ ,  $\epsilon_{2n} = 2,12$ ,  $\epsilon_{1b} = 4,92$ ,  $\epsilon_{2b} = 1,03$  ( $n_n = 3,03$ ,  $\kappa_n = 0,35$ ,  $n_b = 2,23$ ,  $\kappa_b = 0,23$ ). Уменьшение значения  $G$  почти на порядок достигается в модели двух однородных слоев:  $G = 1,70$  при  $h_1 = 6$  нм,  $n_1 = 2,73$ ,  $\kappa_1 = 0,214$ ,  $h_2 = 54$  нм,  $n_2 = 0,49$ ,  $\kappa_2 = 1,17$ . Таким образом, эллипсометрическое моделирование указывает на то, что при значительных экспозициях образование приповерхностного слоя, обогащенного медью, наблюдается и в полученной экспонированием малоинтенсивным светом пленке  $\text{PbI}_2(\text{Cu})$  с низким содержанием меди.

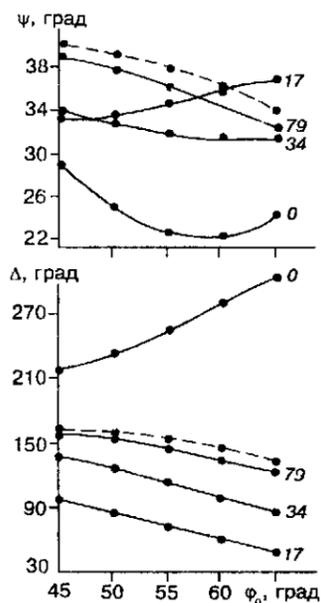
Для получения реального концентрационного профиля в этой пленке проведены масс-спектрометрические и эллипсометрические измерения при ее распылении. Временная зависимость тока вторичных ионов  $I_{63}$  показана на рис. 1. Ток, наибольший в первый момент распыления, и далее спадает сначала резко, а затем плавно. На рис. 2 приведена эволюция угловых зависимостей  $\Psi(\varphi_0)$  и  $\Delta(\varphi_0)$  по мере распыления. Зависимости измерены в интервале  $\varphi_0 = 45 \div 65^\circ$ , что обусловлено ограниченными размерами травленной поверхности. Как видим, наблюдается постепенное приближение зависимостей  $\Psi(\varphi_0)$ ,  $\Delta(\varphi_0)$  к зависимостям, присущим поверхности полированной стали. После длительного травления аргоном, когда сигнал  $I_{63}$  практически уже



отсутствует,  $\Psi$  и  $\Delta$  соответствуют значениям исходной подложки. Оптические постоянные подложки, вычисленные по достигнутым при травлении значениям  $\Psi$  и  $\Delta$ , составили:  $n = 2,41$ ,  $\kappa = 3,78$ . Наиболее вероятно, что здесь имеет место очистка поверхности стали вследствие ионного травления; это приводит к возрастанию ее оптической проводимости  $\sigma_{\text{оп}} = 2\pi k \nu$  [13].

Рис. 1. Зависимость тока  $I_{63}$  вторичных ионов  $^{63}\text{Cu}^+$  и толщины  $h$  пленки фотолегированного  $\text{PbI}_2(\text{Cu})$  с объемной долей меди  $q_0 = 0,09$  от времени распыления ионами  $\text{Ag}^+$

Рис. 2. Угловые зависимости параметров  $\Psi$  и  $\Delta$  подложки из нержавеющей стали (штриховые кривые) и распыляемой разное время ионами  $\text{Ag}^+$  пленки фотолегированного  $\text{PbI}_2(\text{Cu})$  на этой подложке (сплошные кривые). Цифры возле кривых обозначают время распыления (в мин)



Следует отметить, что в результате распыления оптическое качество пленки  $\text{PbI}_2(\text{Cu})$  не ухудшается: после травления пленка дает интерференционные цвета и имеет зеркальную поверхность. Толщина этой остаточной пленки определялась эллипсометрически по однослойной модели с использованием средних по толщине исходной пленки значений оптических постоянных:  $n = 2,586$ ,  $k = 0,352$ . Полученная таким образом зависимость остаточной толщины от времени травления также представлена на рис. 1.

Из кривой  $h(t_p)$ , приведенной на рис. 1, можно получить зависимость скорости распыления  $V_p$  от координаты  $z$ , а из кривых  $I_{63}(t_p)$  и  $h(t_p)$  — зависимость  $I_{63}(z)$ ; обе зависимости показаны на рис. 3. Ток вторичных ионов в каждый момент времени пропорционален скорости распыления и концентрации меди в распыляемом материале. Поэтому распределение концентрации металла по толщине пропорционально:

$$C(z) \sim I_{63}/V_p.$$

Полученное таким образом распределение  $C(z)$  также показано на рис. 3. Как видим, оно характеризуется довольно однородной концентрацией в большей части пленки и приповерхностным слоем с увеличенной концентрацией меди, что подтверждает результаты, найденные с помощью только эллипсометрического метода.

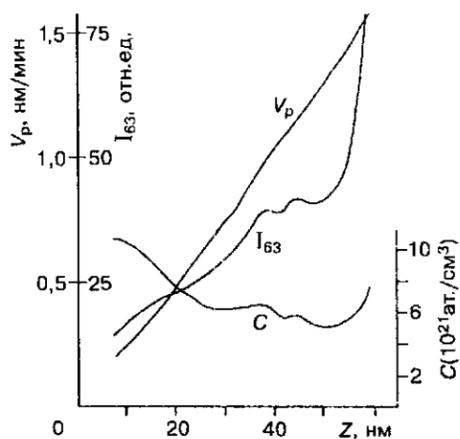


Рис. 3. Распределение по толщине пленки  $\text{PbI}_2(\text{Cu})$  скорости распыления пленки ионами  $\text{Ag}^+$  ( $V_p$ ), тока вторичных ионов  $^{63}\text{Cu}^+$  ( $I_{63}$ ) и концентрации меди в ней ( $C$ )

**Заключение.** Таким образом, эллипсометрическое исследование фотолегированных медью пленок диоксида свинца в совокупности с данными масс-спектрального анализа позволяет построить непротиворечивую картину распределения легирующей примеси по толщине слоев для разных экспозиций и интенсивностей засветки.

В заключение автор выражает благодарность проф. И. З. Индутному за полезные обсуждения результатов работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Индутный И. З., Костышин М. Т., Касярум О. П. и др. Фотостимулированные взаимодействия в структурах металл — полупроводник. Киев: Наук. думка, 1992.
2. Данько В. А., Индутный И. З., Минько В. И. Особенности фотостимулированного переноса серебра в тонкопленочной системе  $As_2S_3$ —Ag // Автометрия. 1990. № 6. С. 67.
3. Honig V., Fedorov V., Liebmann G., Suptitz P. Ellipsometric investigation of Ag-doping profiles in amorphous chalcogenide thin films // Phys. Stat. Sol. (a). 1986. 96, N 2. P. 611.
4. Сопинский Н. В., Бекетов Г. В., Шепелявый П. Е. Эллипсометрические исследования тонкопленочной системы медь — халькогенидный стеклообразный полупроводник // Эллипсометрия в науке и технике. Новосибирск: ИФП СО АН СССР, 1990. Вып. 2. С. 93.
5. Сопинский Н. В., Индутный И. З. Тонкопленочная структура  $PbI_2$ —Cu: характеристики светочувствительности и механизм фотостимулированной диффузии меди // Журн. науч. и прикл. фотогр. 1994. 39, № 6. С. 11.
6. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
7. Основы эллипсометрии /Под ред. А. В. Ржанова. Новосибирск: Наука, 1979.
8. Воробьева Л. П., Дагман Э. Г., Любинская Р. И. и др. Алгоритмы и программы для исследования неоднородных структур методом эллипсометрии. Новосибирск, 1980. (Препр. /СО АН СССР. ИФП; № 51-80).
9. Nelder J. A., Mead R. A simplex method for function minimization // Comput. Journ. 1965. 7, N 4. P. 308.
10. Theriault J. M., Boivin G. Maxwell — Garnett theory extended for Cu— $PbI_2$  cermets // Appl. Opt. 1984. 23, N 24. P. 4494.
11. Индутный И. З., Сопинский Н. В., Стецун А. И. Оптические исследования слоев  $PbI_2$ , фотолегированных медью // УФЖ. 1990. 35, № 12. С. 1791.
12. Ржанов А. В., Свиташева С. Н., Свиташев К. К. Графический метод интерпретации результатов эллипсометрических измерений на шероховатых поверхностях // ДАН СССР. 1983. 273, № 5. С. 1123.
13. Шайкевич И. А., Дрозд П. И., Поперенко Л. В., Сопинский Н. В. Исследование процессов окисления олова в твердом и жидком состояниях эллипсометрическим методом // Оптика и спектроскопия. 1982. 53, № 1. С. 145.

*Поступила в редакцию 13 ноября 1996 г.*