

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ МЕТОДА ЭЛЛИПСОМЕТРИИ В УСЛОВИЯХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОЛЯРИТОНОВ

И.И.Буршта, Е.Ф.Венгер, С.Н.Завадский

Институт физики полупроводников АН Украины,
252650, Киев, Украина
(Поступило в Редакцию 30 октября 1993 г.)

Одним из путей повышения чувствительности эллипсометрических измерений при определении показателей преломления n и поглощения k является измерение поляризационных характеристик отраженного излучения в условиях возбуждения поверхностных поляритонов (ПП). Энергия ПП сосредоточена в тонком приповерхностном слое, что и обуславливает высокую чувствительность характеристик ПП к изменению состояния поверхности и границ раздела исследуемых систем. В работах [1-3] рассмотрены особенности эллипсометрической регистрации ПП. Оценка же чувствительности метода эллипсометрии ПП не проводилась. Цель предлагаемой работы — оценить чувствительность эллипсометрических углов отраженного излучения, возбуждающего ПП, к изменениям оптических параметров исследуемой поверхности и определить чувствительность метода эллипсометрии ПП при измерении поверхностных n и k путем решения обратной эллипсометрической задачи.

Будем считать, что ПП возбуждаются электромагнитным излучением ($\lambda = 0.63 \mu$) на поверхности медного образца ($n = 0.15$, $k = -3.5$) методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) как в схеме Отто, так и Кретчмана с помощью стеклянной призмы НПВО ($n = 1.46$). Проанализируем величины, характеризующие чувствительность эллипсометрии ПП при определении показателей преломления и поглощения на поверхности исследуемого образца.

Поскольку с помощью эллипсометра с целью определения двух оптических констант n и k измеряются два параметра ψ и Δ , то можно говорить о чувствительности эллипсометрических углов к изменению одного из оптических параметров и чувствительности метода эллипсометрии ПП к измерению двух неизвестных оптических параметров.

Чувствительность эллипсометрических углов ψ и Δ — это те минимальные изменения δr_{\min} и δk_{\min} , которые могут быть обнаружены с помощью измерения соответствующего угла, т.е.

$$\delta P_i^{(\psi)} = \left(\frac{\partial \psi}{\partial P_i} \right)^{-1} \delta \psi_{\min}, \quad \delta P_i^{(\Delta)} = \left(\frac{\partial \Delta}{\partial P_i} \right)^{-1} \delta \Delta_{\min},$$

где $i = 1, 2$; $P_1 = n$; $P_2 = k$; $\delta \psi_{\min}$, $\delta \Delta_{\min}$ — минимальные изменения эллипсометрических углов, которые еще могут быть зафиксированы эллипсометром [4].

В работе [4] показано, что величины $\delta\psi_{\min}$ и $\delta\Delta_{\min}$ зависят от модулей амплитудных коэффициентов отражения $|r_s|$ и $|r_p|$ по формулам

$$\delta\psi_{\min} = A/\sqrt{R}, \quad \delta\Delta_{\min} = A\sqrt{R}/(|r_s| \cdot |r_p|), \quad R = (|r_s|^2 + |r_p|^2)/2,$$

где A — коэффициент, зависящий от чувствительности и уровня шума фотоприемника, интенсивности источника и т.п.

Следовательно, выражения

$$\frac{\partial\psi}{\partial P_i}/\sqrt{R} \quad \text{и} \quad \frac{\partial\Delta}{\partial P_i}\sqrt{R}/(|r_s||r_p|)$$

характеризуют чувствительность соответствующего эллипсометрического угла к изменению P_i параметра.

Анализ этих величин показывает, что максимальная чувствительность угла ψ при измерении показателя преломления находится при угле возбуждения ПП $\varphi = 45.5^\circ$, при этом угол Δ совершенно не чувствителен к изменениям n . При определении показателя поглощения наблюдается противоположная картина: при возбуждении ПП максимальная чувствительность к изменениям k уже у угла Δ , т.е. в условиях возбуждения ПП при измерении только показателя преломления (величина k известна) необходимо измерять угол ψ , а при определении только показателя поглощения — угол Δ . Также установлено, что чувствительность эллипсометрических углов к изменениям n и k зависит от величины зазора между исследуемой поверхностью и призмой НПВО в схеме Отто или от толщины пленки, нанесенной на основание призмы НПВО, в схеме Кретчмана. В обоих случаях она максимальна при толщине пленки или зазора d , равной оптимальной. Оптимальная толщина d_{opt} — это толщина, при которой глубина провала в угловых зависимостях коэффициента НПВО R максимальна (R имеет минимальное значение). Условия определения d_{opt} приведены в работе [5], в рассматриваемом нами случае $d_{\text{opt}} = 1.01\lambda$ в схеме Отто (при воздушном зазоре) и $d_{\text{opt}} = 0.08\lambda$ в схеме Кретчмана. При $d = d_{\text{opt}}$ максимальные значения величин, характеризующих чувствительность углов ψ и Δ к изменениям n и k , не зависят от реализуемой схемы метода НПВО, при $d = d_{\text{opt}}$ эти же величины имеют значения, которые значительно выше, чем значения аналогичных величин, характеризующих чувствительность эллипсометрических углов в обычном методе эллипсометрии. Так, чувствительность к изменениям показателя преломления угла ψ возрастает в десятки раз, а угла Δ — в сотни.

Однако чувствительность эллипсометрических углов к изменению одного из оптических параметров не определяет еще чувствительность метода эллипсометрии к определению путем решения обратной задачи показателей преломления и поглощения из измерения двух углов. Поэтому рассмотрим чувствительность самого метода эллипсометрии ПП, т.е. те минимальные изменения n и k , которые могут быть зафиксированы из измерений эллипсометрических углов,

$$\delta n = \left| \frac{\partial n}{\partial \psi} \right| \delta\psi_{\min} + \left| \frac{\partial n}{\partial \Delta} \right| \delta\Delta_{\min}, \quad \delta k = \left| \frac{\partial k}{\partial \psi} \right| \delta\psi_{\min} + \left| \frac{\partial k}{\partial \Delta} \right| \delta\Delta_{\min}.$$

С учетом зависимости величин $\delta\psi_{\min}$ и $\delta\Delta_{\min}$ от модулей коэффициентов отражения, учитывая правила дифференцирования неявных

функций, величины δn и δk можно представить в виде

$$\delta n = A \left(\left| \frac{\partial \Delta}{\partial k} \right| / \sqrt{R} + \left| \frac{\partial \psi'}{\partial k} \right| \sqrt{R} / (|r_s| |r_p|) \right) / J,$$

$$\delta k = A \left(\left| \frac{\partial \Delta}{\partial n} \right| / \sqrt{R} + \left| \frac{\partial \psi'}{\partial n} \right| \sqrt{R} / (|r_s| |r_p|) \right) / J, \quad J = \left| \frac{\partial \Delta}{\partial n} \frac{\partial \psi'}{\partial k} - \frac{\partial \Delta}{\partial k} \frac{\partial \psi'}{\partial n} \right|.$$

На рис. 1, 2 показаны результаты расчета угловых зависимостей величин δn (сплошная кривая) и δk (штриховая кривая) для двух методов определения показателей преломления и поглощения медной поверхности: обычная эллипсометрия (рис. 1) и эллипсометрия ПП (рис. 2). Из рисунков видно, что максимальная чувствительность эллипсометрии ПП почти на порядок выше, чем у обычной эллипсометрии. В отличие от чувствительности эллипсометрических углов чувствительность метода эллипсометрии ПП при углах возбуждения ПП в области оптимальных толщин зазоров слабо зависит от расстояния между исследуемой поверхностью и основанием призмы НПВО. На рис. 2 кривые 1 и 1' получены при $d = d_{\text{opt}} = 1.01\lambda$, кривая 2 — при $d = 0.8\lambda$, кривая 3 — $d = 1.3\lambda$. Эта особенность существенно упрощает экспериментальную реализацию метода эллипсометрии ПП.

Таким образом, проведение эллипсометрических измерений в условиях возбуждения ПП существенно повышает как чувствительность эллипсометрических углов к изменениям оптических параметров исследуемой поверхности, так и чувствительность самого метода эллипсометрии.

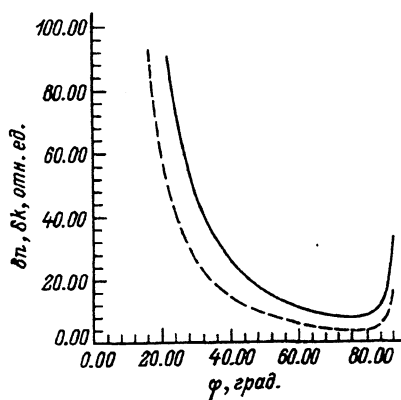


Рис. 1. Чувствительность метода обычной эллипсометрии к определению показателей преломления n (сплошная кривая) и поглощения k (штриховая кривая) ($n = 0.15$, $k = -3.5$, $\lambda = 0.63\mu$).

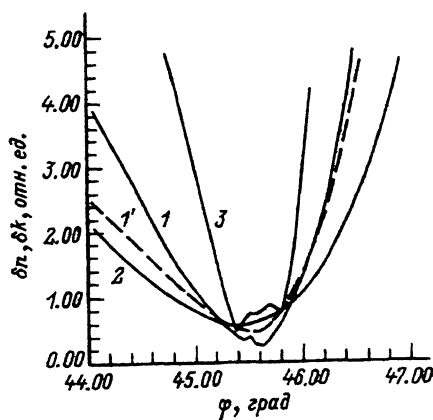


Рис. 2. Чувствительность метода эллипсометрии ПП к определению показателей преломления n (сплошная кривая) и поглощения k (штриховая кривая). $n = 0.15$, $k = -3.5$, $\lambda = 0.63\mu$; 1 — $d = 1.01\lambda$, 2 — 0.8λ , 3 — 1.3λ .

- [1] *Abeles F.A., Catolan L.A., Lopez-Rios T., Lafait O.J.* // Thin Solid Films. 1972. Vol. 13. P. A35.
- [2] *Abeles F.A.* // Surf. Sci. 1976. Vol. 56. N 1. P. 237-250.
- [3] *Никитин А.К.* Автореф. канд. дис. 1986. 14 с.
- [4] *Святицкий К.К., Семеновко А.И., Семеновко А.В. и др.* // Опт. и спектр. 1977. Т. 42. Вып. 6. С. 1142-1147.
- [5] *Никитин А.К., Тищенко А.А.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1983. № 3. С. 38-56.

04;09
© 1994 г.

Журнал технической физики, т. 64, в. 10, 1994

ИСТОЧНИК СФЕРИЧЕСКОГО ВЧ РАЗРЯДА ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

Е.Т.Протасевич

Научно-исследовательский институт ядерной физики
при Томском Политехническом институте им.С.М.Кирова,
634061, Томск, Россия
(Поступило в Редакцию 16 февраля 1994 г.)

В последние годы получили широкое развитие плазменные технологии, связанные с ВЧ разрядами. При этом наряду с традиционными схемами емкостного (ВЧЕ) и индукционного (ВЧИ) разрядов предлагается использовать и более экзотические типы разрядов. Так, в [1] приведено описание конструкции и приведены некоторые результаты исследований ВЧ разряда шаровой конфигурации, который создавался за счет определенной ориентации возбуждающих обмоток на поверхности стеклянного сферического объема с внутренним диаметром 13 см. В таком разряде на частоте $f = 310$ кГц удалось сформировать шарообразный плазмоид, сжимающийся от периферии к центру. По мнению автора [1], это обстоятельство может быть использовано в дальнейшем для получения плотной плазмы. Однако известно, что ВЧ разряд наиболее эффективен, когда частота возбуждения составляет не кГц, а единицы-десятки МГц. По этой причине сказать что-либо об эффективности сферического ВЧ разряда без проведения дополнительных исследований не представляется возможным.

В данной статье кратко описана ВЧ установка для получения сферического разряда, когда в качестве источника ионизации служил перестраиваемый на частоте ВЧ генератор с независимым возбуждением и системой стабилизации частоты ($f = 36-37$ МГц, $\tau = 10-75$ мс, $F = 1-5$ Гц) [2,3].

Упрощенная схема источника сферического ВЧ разряда приведена на рис. 1 [1]. Возбуждающая обмотка представляла собой индуктор, витки которого размещались на поверхности кварцевого баллона в виде октаэдра. Подвод ВЧ мощности от генератора к нагрузке осуществлялся через вершины октаэдра при помощи 6 кабелей. При этом