

С. О. ПАРАШКОВ¹, канд. физ.-мат. наук.

Н. И. СТАСЬКОВ², канд. физ.-мат. наук, доц.

А. Б. СОТСКИЙ², д-р физ.-мат. наук, проф.

А. А. СЕРГЕЙЧИК³

¹Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

²Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова

³ГЦ «Белмикросистемы» (Минск, Беларусь)

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СУРЬМОЙ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ПОСЛЕ БЫСТРОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА

Аннотация

Методом спектральной эллипсометрии исследованы оптические свойства легированных сурьмой кремниевых пластин с одной матированной поверхностью, подвергнутых быстрому термическому отжигу. Для определения оптических характеристик пластин исключено влияние поверхностного оксидного слоя. Это позволило в области полосы собственного поглощения сравнить основные оптические характеристики для чистого и легированного сурьмой кремния. Установлено, что в области точек сингулярности Ван Хова мнимая часть диэлектрической проницаемости легированного кремния меньше чем у чистого. Ширина запрещенной зоны легированного кремния больше чем у чистого. Энергия Урбаха характеризует дефектность кристаллической решетки кремния при внедрении сурьмы.

Ключевые слова: оптические характеристики кремниевых пластин, легирование кремния сурьмой, ширина запрещенной зоны, энергия Урбаха

Приповерхностные слои кремниевых пластин, легированных сурьмой (КЭС, электронный полупроводник), влияют на эксплуатационные свойства интегральных схем, созданных на их основе. В связи с этим большое внимание уделяется развитию оптических методов контроля процесса подготовки поверхности пластин. Важным этапом этой подготовки является пассивирование поверхности полупроводников, поскольку в воздушной среде большинство материалов покрываются пленками естественного окисла. Одним из возможных путей улучшения поверхностных свойств пластин КЭС является быстрая термическая обработка (БТО) [1]. Для интерпретации физических свойств полупроводников используют большое число оптических характеристик [2]. К ним относится диэлектрическая проницаемость $\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_1(\lambda) - i\varepsilon_2(\lambda) = (n(\lambda) - ik(\lambda))^2$, которая в материальных уравнениях Максвелла (для немагнитных сред $\mu = 1$) определяет основные уравнения прикладной эллипсометрии и спектрофотометрии. Изменение оптических свойств кремниевых структур принято интерпретировать по изменению $\varepsilon_1(\lambda)$ и

$\varepsilon_2(\lambda)$ в области точек сингулярности Ван Хова ($E_1 = 3.43$ эВ, $\lambda_1 = 361.5$ нм; $E_2 = 4.25$ эВ, $\lambda_2 = 291.8$ нм, где E – энергия фотона) [3]. Так как строго оценить влияние поверхностного слоя на рассчитываемые оптические константы пластины затруднительно, при использовании методов спектрофотометрии и эллипсометрии рассматривают упрощенную электродинамическую модель, в которой подложка считается однородной, а ее $\varepsilon(\lambda)$ называется псевдо-диэлектрической функцией $\langle \varepsilon(\lambda) \rangle$ [3]. Только в этом частном случае существует аналитическое определение функции $\langle \varepsilon(\lambda) \rangle$. Кроме $\varepsilon(\lambda)$ интерес представляют спектры показателей преломления $n(\lambda)$, поглощения $k(\lambda)$, ширина запрещенной зоны E_g и энергия Урбаха E_u . Две последние величины определяют по коэффициенту поглощения $\alpha(\lambda) = 4\pi k(\lambda)\lambda^{-1}10^7$ ($\alpha(\lambda)$ измеряется в см^{-1} , если λ в измеряется в нм) на основании экстраполяции Тауца экспериментальной функции $[\alpha(\lambda)E]^m$ (параметр m принимает 0.5, 2, 1.5 в зависимости от вида электронного перехода и обеспечивает линейный участок) функцией $B(E - E_g)$ [4] или экстраполяции эмпирической зависимости $\ln[\alpha(E)]$ функцией [5] $f(E) = \ln[\alpha(1240/E_g)\exp[(E - E_g)/E_u]]$. Эти формулы связывают численное значение нормированного на 1см^{-1} экспериментального коэффициента поглощения $\alpha(E) = \alpha_0 \exp[E - E_g/E_u]$. Если измерения проводят на крае полосы собственного поглощения полупроводника, например, применяют спектрофотометрию пропускания, то для определения E_u используют упрощенную формулу [6] $\alpha(E) = \alpha_0 \exp[E/E_u]$. Экстраполяция Тауца используется для определения E_g аморфных и кристаллических полупроводников с совершенной структурой. Величина E_u характеризует несовершенство кристаллической структуры КЭС, которая происходит при внедрении сурьмы в решетку кремния.

Установлено [7], что толщина поверхностного слоя диоксида кремния (SiO_2) на пластинах КЭС-0.015 после физико-химической обработки ~ 1.93 нм, а после БТО ~ 1 нм. Наблюдаемые методом спектральной эллипсометрии изменения $\langle k(\lambda) \rangle$ и $\langle n(\lambda) \rangle$ в УФ области спектра, содержащей точки сингулярности Ван Хова, позволили считать, что БТО приводит к увеличению структурного совершенства поверхностного слоя пластин в результате твердофазной рекристаллизации.

В настоящем сообщении использована методика исключения влияния поверхностного оксидного слоя, находящегося на кремниевых пластинах КЭС-0,015 после БТО, на определяемые методами эллипсометрии основные оптические характеристики $\varepsilon_1(\lambda)$, $\varepsilon_2(\lambda)$, E_g и E_u . Это позволило сравнить эти характеристики для чистого и легированного сурьмой кремния.

В качестве образцов использовались пластины КЭС-0.015 с кристаллографической ориентацией $\langle 100 \rangle$, прошедшие стандартную химико-механическую полировку одной поверхности. После этого на данных образцах проводилась БТО путем облучения световым импульсом с нерабочей стороны пластины в течение 7 с в среде Ar при температуре 1075°C . В результате такой подготовки образцов информативность оптических методов обеспечивает приповерхностный слой пластины толщиной порядка глубины проникновения света (рис. 1).

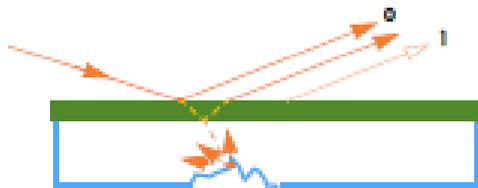


Рис. 1. Модель образца с шероховатой нижней границей подложки

Спектры эллипсометрических углов $\Delta(\lambda)$ и $\psi(\lambda)$ пластин, подвергнутых БТО, измеряли на эллипсометре HORIBA UVISSEL 2 при угле падения 70° в спектральной области от 200 нм до 2000 нм. Эта область включала полосу собственного поглощения полупроводника с точками сингулярности Ван Хова и область Урбаха, в которой содержатся переходы на уровни сурьмы. Мы предприняли попытку исключить плоскопараллельный слой SiO_2 известной толщины ($d = 1$ нм) и с известным показателем преломления [8] в алгоритме расчетов спектров $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ подложки КЭС-0.015, комплексная диэлектрическая проницаемость которой $\varepsilon(\lambda)$ находится численно без использования какой - либо дисперсионной модели. Она является корнем уравнения $f(\varepsilon) = \tan \psi \exp(i\Delta)$, вычисляемым методом контурного интегрирования [9]. Здесь $f(\varepsilon) = r_p(\varepsilon) / r_s(\varepsilon)$, r_p и r_s - амплитудные коэффициенты отражения поляризованных волн от структуры слой SiO_2 - подложка, в которых дисперсия диэлектрической проницаемости слоя SiO_2 учитывается трехчленной формулой Селлмейера [8]. В качестве первых приближений $\varepsilon_1(\lambda)$ и $\varepsilon_2(\lambda)$ выбрали диэлектрические функции cSi, которые рассчитали по спектрам $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ из работы [10]. На рис. 2 приведены спектры $\varepsilon_1(\lambda)$ и $\varepsilon_2(\lambda)$ двух полупроводников cSi и КЭС-0.015. Максимумы функций $\varepsilon_2(\lambda)$ приходятся на длины волн 291.8 нм и 361.5 нм, соответствующие точкам сингулярности Ван Хова. В этой спектральной области для КЭС спектр $\varepsilon_2(\lambda)$ расположен под соответствующим спектром для cSi. Отношение диэлектрических проницаемостей на длинах волн 291.8 нм и 361.5 нм равно соответственно 1.15 и 1.04. В видимой области $\varepsilon_2(\lambda)$ для cSi меньше $\varepsilon_2(\lambda)$ для КЭС, а их спектры $\varepsilon_1(\lambda)$ практически совпадают. Спектры $\varepsilon_1(\lambda)$ для cSi и КЭС существенно отличаются лишь в области от 200 нм до 290 нм. Для определения ширины запрещенной зоны КЭС использовали методику, предложенную в работе [5].

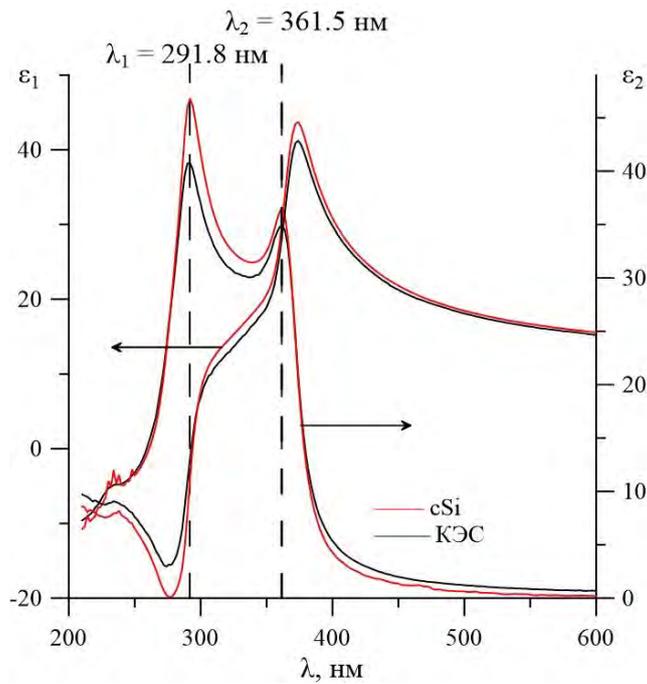


Рис. 2. Диэлектрические функции чистого и легированного кремния

На экспериментальной зависимости $\ln[\alpha(\lambda)]$ от E (рис. 3) можно выделить два линейных участка, которые можно интерполировать прямыми $f_1(E)$ и $f_2(E)$. Первый участок расположен в коротковолновой области ($E_{g1} = 1.51$ эВ и $E_{u1} = 0.52$ эВ), а второй находится в длинноволновой области ($E_{g2} = 1.06$ эВ и $E_{u2} = 0.05$ эВ). Величины E_{g2} и E_{u2} характеризуют чистый cSi, а величины E_{g1} и E_{u1} характеризуют КЭС.

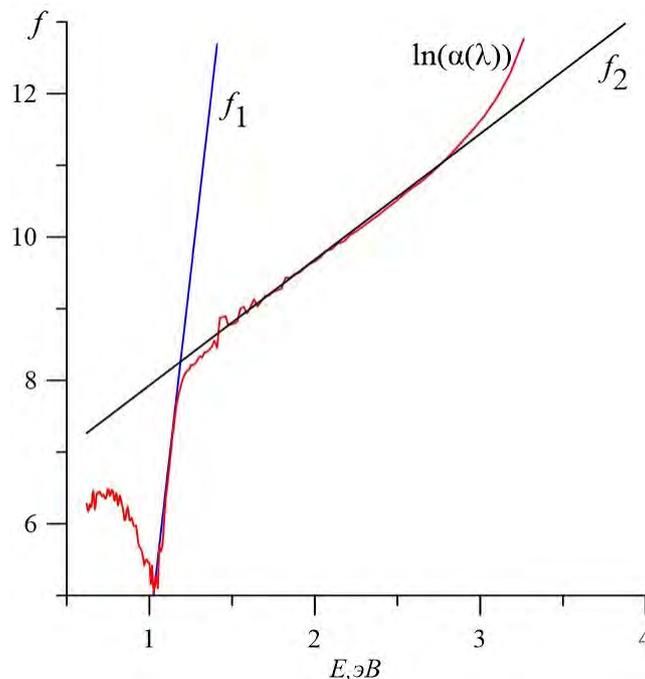


Рис. 3. Определение ширины запрещенной зоны КЭС-0.015

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований РБ «1.15 Фотоника и электроника для инноваций».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Solodukha, V. A.** Spectral Ellipsometry as a Method of Investigation of Influence of Rapid Thermal Processing of Silicon Wafers on their Optical Characteristics / V.A. Solodukha [et al.] // *Devices and Methods of Measurements*. – 2022. – Vol. 13, № 3. – P.199-207. DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-3-199-207.
- 2 **Уханов, Ю. И.** Оптические свойства полупроводников / Ю. И. Уханов. – М.: Наука, 1977. – 368 с.
- 3 **Fujiwara, H.** Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications / H.Fujiwara // London: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. – 369 p.
- 4 **Таус, J.** Optical properties and electronic structure of amorphous germanium / J. Tauc, R. Grigorovici, A. Vanacu // *Phys. Status Solidi B*. – 1966. – Vol. 15. – P.627-637. DOI:10.1002/pssb.19660150224
- 5 **Gaponenko, N.V.** Upconversion luminescence from sol-gel-derived erbium- and ytterbium-doped BaTiO₃ film structures and the target form / N. V. Gaponenko, N. I. Staskov, L. V. Sudnik, P. A. Vityaz [et al.] // *Photonics*. – 2023. – Vol. 10, № 4. – P.359-371. DOI:10.3390/photonics10040359
- 6 **Rasool, S.** Effect of annealing on the physical properties of thermally evaporated In₂S₃ thin film / S. Rasool [et al.] // *Current Applied Physics*. – 2019. – Vol. 19. – P.108-113.
- 7 **Анищик, В. М.** Изменение оптических параметров кремния после быстрой термической обработки / В. М. Анищик [и др.] // *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. – 2021, № 3. – С.81-85. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2021-3-81-85>
- 8 **Malitson, I. H.** Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica / I. H. Malitson // *J. Opt. Soc. Am.* – 1965. – Vol. 55, № 10. – P.1205-1209.
- 9 **Сотский, А. Б.** Теория оптических волноводных элементов: монография / А. Б. Сотский // Могилев: УО «МГУ имени А. А. Кулешова». – 2011. – 456 с.
- 10 **Palik, E. D.** Handbook of Optical Constants of Solids / E. D. Palik // Orlando: Academic Press. – 1988. – 547 p.

Контакты:

sema.fm@mail.ru (Семён Олегович Парашков)

ni_staskov@mail.ru (Николай Иванович Стаськов)

ab_sotsky@mail.ru (Александр Борисович Сотский)

anna.omelchenko.13177@mail.ru (Анна Александровна Сергейчик)