

06.2;06.3;07;12

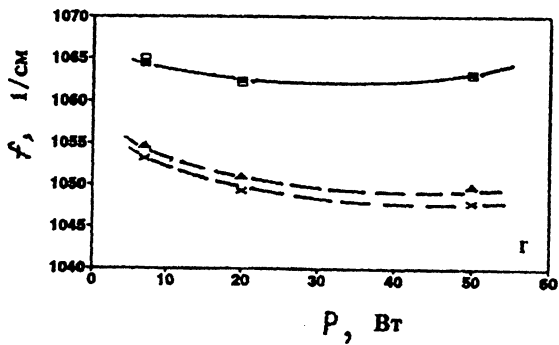
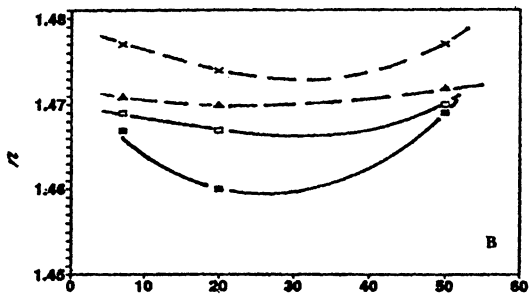
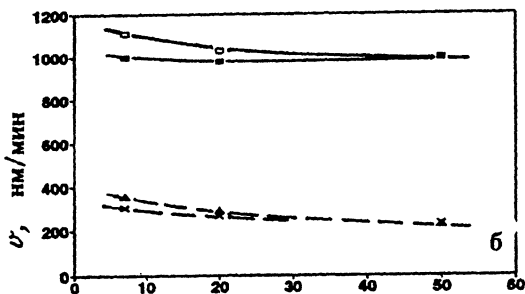
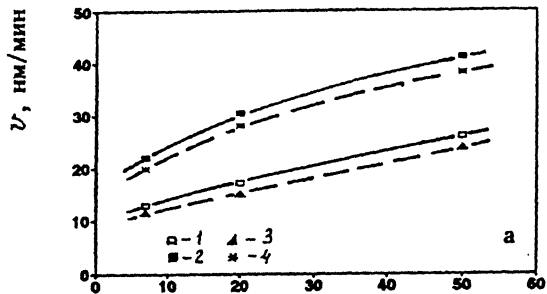
©1994

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК SiO<sub>2</sub>, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

*Ф. Н. Тимофеев, К. Бозкурт, М. Гюре, А. Айдинли,  
Ш. Сюзар, Р. Эллиолтиоглы, К. Тюркоглы*

Двуокись кремния является одним из наиболее широко применяемых в микро- и оптоэлектронике диэлектрических материалов [1]. В настоящее время усилия многих исследователей направлены на разработку технологий, позволяющих выращивать тонкие пленки SiO<sub>2</sub> при достаточно низкой температуре (менее 350°C) [2-5]. Плазмохимическое осаждение (ПХО) (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)) — один из наиболее широко применяемых технологических методов получения тонких диэлектрических пленок, который благодаря наличию ионизированного плазменным разрядом реагентов позволяет существенно снизить температуру проведения процесса [6]. Целью настоящей работы являлось получение достаточно совершенных пленок SiO<sub>2</sub> методом ПХО при температуре процесса 100–250°C, а также исследование свойств этих пленок методами оптической инфракрасной Фурье-спектроскопии и оптической эллипсометрии.

Пленки двуокиси кремния толщиной 70–130 нм выращивались на поверхности *p*-Si(100) подложек методом ПХО на установке "Plasmalab  $\mu$ P" из следующих газов: чистый N<sub>2</sub>O и смесь SiH<sub>4</sub>(2%)+Ar(98%). Плазменный разряд в рабочей камере установки поддерживался с помощью ВЧ генератора (13.56 МГц). Циклы нанесения пленок проводились при давлении в рабочей камере 0.3–0.5 Тор, мощности ВЧ генератора 7–50 Вт, температуре подложкодержателя 100–250°C и соотношении газовых потоков SiH<sub>4</sub>+Ar:N<sub>2</sub>O, равном 1:4. Толщина полученных пленок измерялась с помощью профилометра "Dectak" и оптическим способом на установке "NanoSpec/AFT". Инфракрасные спектры поглощения пленок SiO<sub>2</sub> исследовались в диапазоне 200–4000 см<sup>-1</sup> с помощью инфракрасного Фурье-спектрометра (ИКФС) "Bomen" с разрешением 2 см<sup>-1</sup> и усреднением по 100 сканированиям. Измерения показателя преломления пленок проводились на автоматическом эллипсометре "Rudolph".



### Рис. 1. Зависимости:

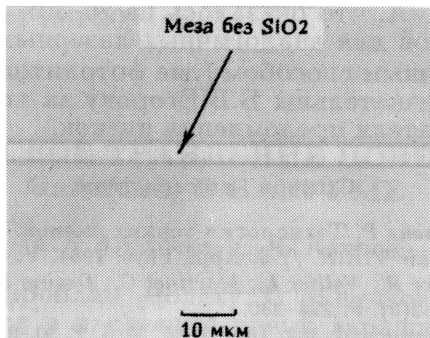
$a$  — скорости роста,  $b$  — скорости химического травления в "буферном" травителе ( $\text{HF} + \text{NH}_4\text{F} + \text{H}_2\text{O}$ ),  $e$  — показателя преломления,  $z$  — спектрального положения полосы ИК поглощения Si-O связи пленок двуокиси кремния от ВЧ мощности, подводимой к плазменному разряду. Пленки выращены методом ПХО при: 1 —  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.3$  Тор  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.5$  Тор  $T = 250^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.3$  Тор  $T = 250^\circ\text{C}$ ,  $P = 0.5$  Тор при постоянном потоке газов (2%)  $\text{SiH}_4 + \text{Ar}(98\%) - 180 \text{ см}^3/\text{мин}$  и  $\text{N}_2 - 710 \text{ см}^3/\text{мин}$ .

Из многих технологических параметров, влияющих на рост пленок  $\text{SiO}_2$  мы выбрали мощность ВЧ генератора, давление в камере и температуру подложкодержателя. На рис. 1,  $a$  приведена зависимость скорости роста от мощности ВЧ генератора для пленок  $\text{SiO}_2$ , выращенных при температуре подложкодержателя 100 и  $200^\circ\text{C}$ , давлении в рабочей камере 0.3 и 0.5 Тор. Видно, что скорость роста пленок увеличивается с увеличением мощности ВЧ сигнала, подведенного к электродам рабочей камеры, а также при увеличении давления в камере, что свидетельствует об увеличении количества ионизированных реагентов, ответственных за рост пленки двуокиси кремния. Увеличение мощности ВЧ сигнала, подведенного к плазменному разряду, наряду с увеличением вероятности диссоциации реагирующих молекул, приводит к увеличению энергии ионов, бомбардирующих поверхность, и увеличению скорости их десорбции на растущей пленке, способствуя росту более стабильного двуоксида кремния. Отметим также, что скорость роста пленок уменьшалась с понижением температуры подложкодержателя, что является обычным для используемой технологии роста. Нами было проведено исследование скорости химического травления пленок  $\text{SiO}_2$  (полученных в условиях, приведенных на рис. 1,  $a$ ) в травителе, содержащем  $\text{HF}(49\%)$  и 30%-й водный раствор  $\text{NH}_4\text{F}$ , смешанные в пропорции 1:8 (объемная пропорция). На рис. 1,  $b$  приведены результаты этих измерений. Видно, что скорость химического травления пленок  $\text{SiO}_2$  имеет тенденцию к уменьшению с увеличением мощности ВЧ сигнала, подведенного к плазменному разряду в рабочей камере, что связано с уплотнением  $\text{SiO}_2$  при увеличении энергии ионов, участвующих в процессе формирования пленки [3]. Этот вывод также подтверждается исследованиями зависимости показателя преломления пленок от подводимой к плазменному разряду мощности (рис. 1,  $e$ ). Из графика видно, что показатель преломления пленок  $\text{SiO}_2$ , полученных при мощности ВЧ разряда 50 Вт, выше, чем для пленок, нанесенных при мощности ВЧ генератора 20 Вт. Скорость химического травления пленок, полученных при температуре роста  $250^\circ\text{C}$ , оказалась более чем в 2 раза ниже, чем в случае хи-

мического травления пленок, выращенных при температуре  $100^{\circ}\text{C}$ .

Природа химических связей в полученных пленках исследовалась с помощью ИКФС измерений. Инфракрасные спектры поглощения полученных пленок  $\text{SiO}_2$  содержат три основных пика полос (полоса  $1050\text{--}1070$ , полоса около  $820$  и полоса вблизи  $460\text{ см}^{-1}$ ), соответствующих поглощению Si-O связи. Мы исследовали влияние параметров процесса ПХО на наиболее сильную полосу инфракрасного поглощения пленок  $\text{SiO}_2$ , расположенную вблизи  $1065\text{ см}^{-1}$ . На рис. 1, 2 приведена серия зависимостей положения максимума этой полосы поглощения от параметров процесса роста, описанных выше. Из этих зависимостей видно, что положение исследуемой полосы ИК поглощения для пленок, выращенных при температуре подложкодержателя  $100^{\circ}\text{C}$ , сдвинуто в область меньших энергий (на величину около  $10\text{--}15\text{ см}^{-1}$ ) относительно положения этой же полосы для пленок, выращенных при температуре  $250^{\circ}\text{C}$ . Эти данные позволяют сделать предположение о том, что пленки  $\text{SiO}_2$ , выращенные при большей температуре, являются более плотными (в физическом и оптическом понимании). Это предположение подтверждается данными о скорости химического травления и показателе преломления пленок (рис. 1, б, в). Более плотные пленки двуокиси кремния, полученные при температуре  $250^{\circ}\text{C}$  характеризуются меньшей скоростью химического травления и большим значением показателя преломления. Мы провели эксперименты по отжигу пленок  $\text{SiO}_2$ , полученных при  $100^{\circ}\text{C}$  и малой ВЧ мощности. В результате одномоментного фотонного отжига этих пленок при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  в атмосфере аргона произошло уплотнение структуры пленок, уменьшение скорости их химического травления в 3-4 раза и сдвиг пика ИК поглощения Si-O связей в положение  $1075\text{ см}^{-1}$  (это значение характерно для пленок  $\text{SiO}_2$  толщиной  $100\text{ нм}$ , полученных методом термического окисления при  $T > 1000^{\circ}\text{C}$ ). Отметим, что в спектрах ИК поглощения исследуемых пленок присутствовали очень слабые полосы, соответствующие связям: Si-O-H ( $3300\text{--}3600\text{ см}^{-1}$ ), Si-H<sub>2</sub> ( $910\text{--}920\text{ см}^{-1}$ ). Эти полосы исчезали в спектрах ИК поглощения пленок, подвергнутых фотонному отжигу в атмосфере аргона при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  в течение менее 1 мин, и их возникновение, в частности, могло быть связано с абсорбцией паров воды исследуемыми пленками из атмосферы при хранении.

Применение  $\text{SiO}_2$ , полученного при температуре  $100^{\circ}\text{C}$ , позволило нам существенно упростить технологию создания электрической изоляции в полупроводниковых полосковых инжекционных мезалазерах на основе  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$



**Рис. 2.** Микрофотография вида сверху на лазерную мезаструктуру после операции локального удаления с верхней части мезы слоя  $\text{SiO}_2$  с фоторезистом методом взрыва в ацетоне (светлая полоса на снимке). Область структуры, окружающая мезу, осталась покрытой  $\text{SiO}_2$ .

двойной гетероструктуры. На исходной лазерной структуре методом стандартной фотолитографии создавалась маска в виде полос шириной 5–10 микрон из фоторезиста AZ-5214 толщиной 1.4 мк. Далее в лазерной структуре методом реактивного ионного травления в фреоне-12 создавалась меза глубиной 1.2 мк (были удалены GaAs контактный слой и 0.4 мк слоя AlGaAs). После этого на сформированную структуру с сохраненной маской из фоторезиста был нанесен слой  $\text{SiO}_2$  толщиной 100 нм. Двоокись кремния была нанесена методом, рассмотренным выше при мощности ВЧ генератора 7 Вт, давлении в камере 0.3 Тор и температуре 100 °С. Низкая температура нанесения окисла позволила предохранить маску из фоторезиста на мезах от перегрева и провести операцию локального удаления фоторезиста вместе с окислом с мез методом взрыва в кипящем ацетоне. Таким образом, на поверхности мез были сформированы окна для нанесения контактов, причем размер этих окон был в точности равен ширине формируемой мезы. На тестовых структурах рассмотренным методом нам удалось осуществить операцию вскрытия окон в  $\text{SiO}_2$  на вершинах мез размером менее 500 нм.

На рис. 2 приведена фотография вида сверху на мезаструктуру после операции удаления слоя  $\text{SiO}_2$  вместе с фоторезистом. После нанесения контактов к *p*- и *n*-областям и отжига лазерная структура была полностью сформирована. Инжекционные лазеры с резонатором Фабри-Перо длиной 250–400 м, изготовленные из этой структуры, имели пороого-

вый ток 20–40 мА, что оказалось на 20–30% ниже значений пороговых токов для аналогичных лазерных структур, полученных обычным способом (две фотолитографии [7]).

Авторы признательны Б.В.Егорову за помощь в исследовании показателя преломления пленок.

### Список литературы

- [1] Майсел Л., Глэнг Р. Технология тонких пленок. М. С. 233.
- [2] Pande K.P., Nair V.K.R. // J. Appl. Phys. 1984. V. 55. P. 3109–3114.
- [3] Jubert O., Burke R., Vallier L., Martinet C., Devine R.A. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 62(3). P. 228–230.
- [4] Irene E.A. // Semicond. Int. June 1985. V. 5. P. 91–93.
- [5] Gonzalez P., Garcia T., Pou J., Fernandez D., Leon B., Perez-Amor M. // Appl. Surface Sci. 1992. V. 54. P. 108–111.
- [6] Hess D.H. // J.Vac. Sci. Technol., 1984. A2. P. 244.
- [7] Кейси Х., Паниш М. Лазеры на гетероструктурах. Т. 2. М., 1981.

Физико-технический  
институт им.А.Ф.Иоффе  
Санкт-Петербург;  
Билкентский университет  
Анкара, Турция

Поступило в Редакцию  
26 апреля 1994 г.