

К вопросу деградации тонких пленок оксида кремния в условиях высоких тепловых нагрузок

А. А. Скворцова, О. В. Володина, А. А. Скворцов

Московский политехнический университет, Москва, Россия

Работа посвящена исследованию термоупругих напряжений и дефектообразованию в тонких пленках SiO₂ на кремнии при локальном импульсном нагреве поверхности. Показано, что воздействие на поверхности теплового источника (импульсный нагрев металлизированного участка поверхности, либо импульс лазерного диода $\lambda=405$ нм, P=5 Вт) тепловой мощностью $6 \cdot 10^5$ Вт/м² приводит к образованию микротрещин в пленках SiO₂. Проведена оценка величины механических напряжений, возникающих в структуре SiO₂-Si при тепловом ударе. Показано, что в отличие от пленок SiO₂ уровня возникающих механических напряжений в кремнии недостаточно для образования трещин вблизи источника теплового удара.

Ключевые слова: Тонкие пленки оксида кремния, Термоудар, Механические напряжения.

Цитирование: Скворцова, А. А. К вопросу деградации тонких пленок оксида кремния в условиях высоких тепловых нагрузок / А. А. Скворцова, О. В. Володина, А. А. Скворцов // NOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 439–443.

Хорошо известно, что в современной оптоэлектронике активно используются тонкопленочные структуры на основе тонких пленок оксида кремния в качестве оптических элементов, подзатворного диэлектрика, пассивирующих слоев и т.д [1,2]. Тонкие пленки оксида кремния используются также в качестве мембран в оптических фильтрах. При этом термические воздействия в процессе технологических операций могут приводить к возникновению в них растягивающих напряжений от 100 до 300 МПа. Обнаружено также, что коэффициент теплового расширения и остаточные напряжения в тонких пленках изменяются в зависимости от толщины пленки [3].

Высокие тепловые нагрузки на пленку могут приводить формированию трещин различной формы, такие как спирали, аллеи полумесяцев и разно ориентированные полосы [4]. Многие уникальные морфологии трещин могут наблюдаться не только после термоударов, но и после высокотемпературной сушки [5,6].

Таким образом, процесс трещинообразования в тонких пленках оксида кремния играет очень важную роль в технологических процессах оптоэлектроники. Однако далеко не все аспекты трещинообразования в пленках SO₂ детально изучены. К примеру, недостаточно информации по влиянию поверхностных источников термоудара на образование трещин в пленках, не выявлены критические параметры тепловых импульсов, способствующих образованию и развитию трещин в тонких пленках оксида.

Для оценки температуры поверхности пленки использовалось полученное ранее уравнение, позволяющее оценить распределение температуры по поверхности пленки при наличии источника тепла в виде металлизированного участка поверхности (рис. 1) с

плотностью теплового потока (при протекании постоянного тока силой I вдоль оси x дорожки с сопротивлением R):

$$q = \frac{I^2 R}{lb}. \quad (1)$$

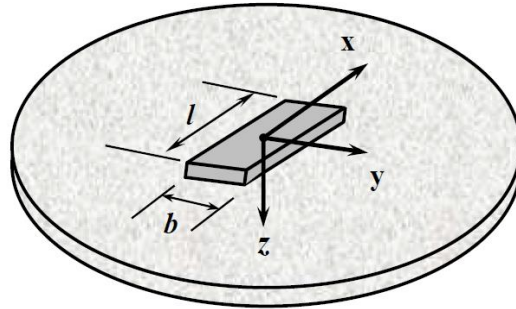


Рис. 1. Схема расположения исследуемого фрагмента металлизации на пластине

Распределение температуры на поверхности $T(y, \tau)$ представляется в виде [7]

$$T(y, t) - T_0 = \frac{I^2 R}{2\pi\lambda lb} \left\{ \left(\frac{b}{2} - y \right) E_1 \left(\frac{(b/2 - y)^2}{4at} \right) + \left(\frac{b}{2} + y \right) E_1 \left(\frac{(b/2 + y)^2}{4at} \right) + \frac{I^2 R \sqrt{at}}{\sqrt{\pi\lambda lb}} \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{b/2 - y}{\sqrt{4at}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{b/2 + y}{\sqrt{4at}} \right) \right\} \right\}, \quad (2)$$

где $E_1(z) = \int_z^\infty \frac{\exp(-\xi)}{\xi} d\xi$ – интегральная экспонента, l , b – длина и ширина фрагмента металлизации соответственно, λ – теплопроводность, c , d , a – теплоемкость, плотность и температуропроводность соответственно. Поскольку λ , c , d , a зависят от температуры, то, как и ранее [7], для расчетов T использовались их значения, усредненные по температуре.

Результаты расчета по уравнению (2) для систем Al-Si и Al-SiO₂ показали, что температурный профиль $T(y, t)$ в направлении поперек дорожки металлизации неоднороден. Причем с увеличением плотности мощности импульса (диапазон изменения $P = (1,5 \dots 8) \cdot 10^5$ Вт/м²) в импульсе изменения температуры $\Delta T(t) = T(0, t) - T(b/2, t)$ могут достигать на структуре Al-SiO₂ ~100 К. Такие тепловые «нагрузки» способствуют появлению сильных температурных градиентов и соответственно возникновению механических напряжений:

$$\sigma_{ik} = -K\beta \{T(r, t) - T_0\} \delta_{ik}. \quad (3)$$

что может приводить к релаксации напряжений путем пластической деформации и образованию трещин в приповерхностном слое материала, на который нанесена металлическая пленка. Здесь и далее σ_{ik} – тензор напряжений; K – модуль всестороннего сжатия; β – коэффициент теплового расширения; δ_{ik} – тензор Кронекера.

Результаты расчета механических напряжений приведены на рис. 2. Нетрудно видеть, что при мощности электрического импульса $4,3 \cdot 10^5$ Вт/м² на межфазной границе структуры Al-SiO₂ возникающие напряжения превышают предел прочности материала подложки (пунктир, рис. 2). Поэтому при таких условиях в рассматриваемой системе могут развиваться процессы образования трещин [8]. При этом наибольший рост величины механических напряжений происходит в первые 150–200 мкс с момента включения импульса (рис. 2).

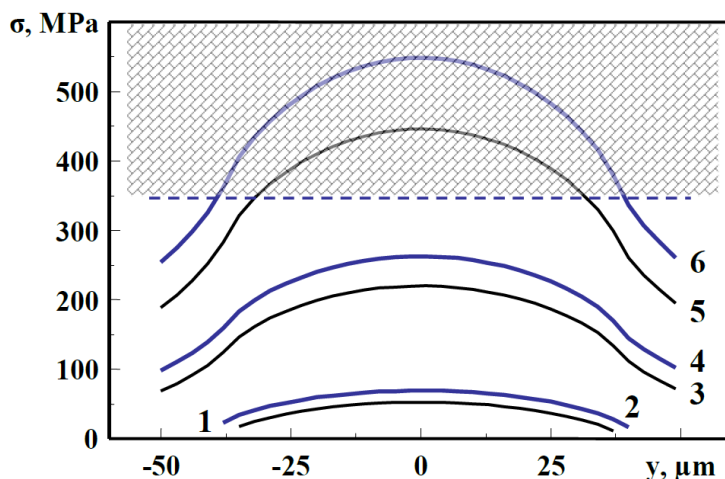


Рис. 2. Распределение механических напряжений на межфазной границе алюминиевая пленка-подложка Si (кривые 1,3,5) и SiO₂ (кривые 2,4,6) в процессе прохождения импульса тока при $t=150 \mu\text{s}$ с момента включения и удельной мощности: 1,2– $1,2 \cdot 10^5$ Вт/м²; 3,4– $2,7 \cdot 10^{10}$ Вт/м²; 5,6– $4,3 \cdot 10^{10}$ Вт/м². Пунктирная линия – предел прочности для SiO₂ $\sigma_B=300$ МПа

Таким образом, результаты численного моделирования показали, что в результате теплового удара на поверхности кристалла SiO₂ возможно достижение механических напряжений сравнимых с пределом прочности.

Экспериментальная проверка осуществлялась на многослойных структурах кремниевая подложка - пленка оксида кремния-алюминиевая пленка (Si-SiO₂-Al). В качестве подложек использовались легированные фосфором кремниевые монокристаллические пластины толщиной 300 мкм, с удельным сопротивлением в диапазоне $\rho = 0,1$ Ом·см. В качестве проводящей металлической пленки был использован алюминий толщиной 5 мкм. Нанесение пленок термического оксида производилось в диффузионных печах путем отжига кремниевых подложек в диапазоне температур 1150–1250 °С в сухом кислороде в течении 1-5 часов. Толщина пленок SiO₂ варьировалась в диапазоне 0,08...0,16 мкм.

Формирование тестовых структур и исследование их температурных режимов работы в импульсном режиме осуществлялись по методике [9]. Тепловой удар на поверхности пленки оксида обеспечивался прохождением одиночных токовых импульсов различной формы или излучением лазерного диода ($\lambda = 405$ нм, $P = 5$ Вт). Анализ температуры поверхности пленки проводился с помощью тестовых структур осциллографическим методом по методике [9].

Результаты экспериментальных исследований показали, толщина диэлектрического подслоя сильно влияет на тепловые режимы многослойных систем. Изменение толщины

пленки оксида кремния h_2 с 0,1 до 0,16 мкм повышает температуру Al-пленки T_1 с 390 до 440 К при $t=400$ мкс с момента включения импульса. Это приводит к более раннему перегреву структур. Так при одинаковой удельной мощности импульса тока $P = 2,8 \cdot 10^5$ А/м² прогрев дорожек металлизации происходит тем быстрее, чем больше толщина промежуточного полупроводникового слоя. И, следовательно, увеличению механических напряжений.

Проведенные металлографические исследования подтвердили наличие процессов трещинообразования в пленках оксида кремния при достижении критических плотностей тока (рис. 3) и на границе дорожки ($y = \pm b/2$) образование трещин четко фиксируется (рис. 3).



1 – дорожка металлизации после оплавления, 2 – микротрещино в пленке оксида кремния

Рис. 3. Фотография поверхности оксидной пленки с напыленной дорожкой алюминиевой металлизации после прохождения одиночного токового импульса удельной мощностью $P=3,4 \cdot 10^5$ Вт/м² и длительностью $\tau=500$ мкс.

Таким образом, в работе рассмотрено влияние тонких диэлектрических слоев оксида кремния на динамику нагрева межсоединений на кремнии и возникающие при этом в структурах механические напряжения. Показано, что прохождение токовых импульсов амплитудой до $5 \cdot 10^5$ Вт/м² (длительностью до 500 мкс) приводит к тепловому разрушению межсоединений вплоть до обрывов электрической цепи. Возникающие при это механические напряжения термоупругой природы приводят к образованию трещин в тонких пленках оксида кремния.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 22-29-01373.

Список источников

- [1] Büchner C., Heyde M. Two-dimensional silica opens new perspectives. //Progress in Surface Science. 2017. Vol. 92. Iss.4. P. 341-374.
- [2] Nikitin T., Khriachtchev L. Optical and structural properties of Si nanocrystals in SiO₂ films. //Nanomaterials. 2015. Vol. 5. Iss. 2. P. 614-655.
- [3] Ghaderi M., De Graaf G., Wolffenbuttel R.F. Thermal annealing of thin PECVD silicon-oxide films for airgap-based optical filters. // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2016. Vol. 26. Iss. 8. Article №084009.

- [4] Goehring L., Nakahara A., Dutta T., Kitsunezaki S., Tarafdar S. Desiccation Cracks and their Patterns: Formation and Modelling in Science and Nature. Wiley-VCH Verlag GmbH. 2015. 349 p.
- [5] Cheng F., Ma L., Ni Y. Formation of wavy crack morphology in silicon oxide films due to collaborative interface debonding. //Scientia Sinica: Physica, Mechanica et Astronomica. 2018.Vol. 48. Iss. 9. Article N° 094614. 10 p.
- [6] Ho C., Alexis J., Dalverny O., Balcaen Y., Dehoux A., Châtel S., Faure B. Mechanical adhesion of SiO₂ thin films onto polymeric substrates. //Surface Engineering. 2019. Vol. 35. Iss. 6. P. 536-541.
- [7] Skvortsov A.A., Varlamov D.O., Nikolaev V.K., Volodina O.V., Skvortsova A.A. Shock-wave Processes in the Electric Explosion of Thin-Film Systems on Silicon. // Silicon. 2023. 15(4). P. 1987–1992.
- [8] William C. O'Mara, Robert B., Herring Lee P. Hunt. Handbook of Semiconductor Silicon Technology. 1990. Imprint: William Andrew. 815 p.
- [9] Skvortsov A., Zuev S., Koryachko M., Glinskiy V. Thermal shock and degradation of metallization systems on silicon. //Microelectronics International. 2016. Vol.33. Iss. 2. P. 102-106.

On the issue of degradation of thin films of silicon oxide under conditions of high thermal loads

A. A. Skvortsova, O. V. Volodina, A. A. Skvortsov

Moscow polytechnic university, Moscow, Russia

The work is devoted to the study of thermoelastic stresses and defect formation in thin films of SiO₂ on silicon under local pulsed heating of the surface. It is shown that the impact of a heat source on the surface (pulse heating of a metalized surface area, or laser diode pulse $\lambda=405$ nm, $P=5$ W) with a thermal power of $6 \cdot 10^5$ W/m² leads to the formation of microcracks in SiO₂ films. An estimate of the magnitude of mechanical stresses arising in the SiO₂-Si structure under thermal shock has been carried out. It is shown that, in contrast to SiO₂ films, the level of mechanical stresses that arise in silicon is insufficient for the formation of cracks near the source of thermal shock.

Keywords: Silica thin films, Thermal shock, Mechanical stress.