

## 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 SiO<sub>2</sub> 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/м<sup>2</sup> приводит к образованию микротрещин в пленках SiO<sub>2</sub>. Проведена оценка величины механических напряжений, возникающих в структуре SiO<sub>2</sub>-Si при тепловом ударе. Показано, что в отличие от пленок SiO<sub>2</sub> 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].

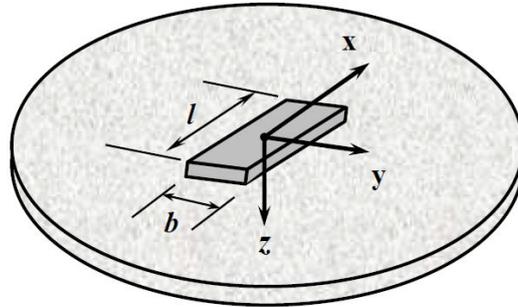
Высокие тепловые нагрузки на пленку могут приводить формированию трещин различной формы, такие как спирали, аллеи полумесяцев и разно ориентированные полосы [4]. Многие уникальные морфологии трещин могут наблюдаться не только после термоударов, но и после высокотемпературной сушки [5,6].

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 SO<sub>2</sub> 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]

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

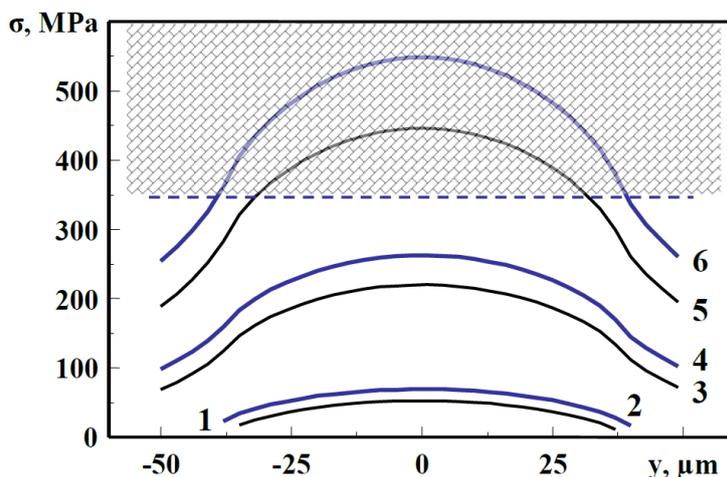
где  $E_1(z) = \int_z^\infty \frac{\exp(-\xi)}{\xi} d\xi$  – интегральная экспонента,  $l$ ,  $b$  длина и ширина фрагмента металлизации соответственно,  $\lambda$  – теплопроводность,  $c$ ,  $d$ ,  $a$  – теплоемкость, плотность и температуропроводность соответственно. Поскольку  $\lambda$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $a$  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-SiO<sub>2</sub> 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/м<sup>2</sup>) в импульсе изменения температуры  $\Delta T(t) = T(0, t) - T(b/2, t)$  могут достигать на структуре Al-SiO<sub>2</sub> ~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  $\sigma_{ik}$  – тензор напряжений;  $K$  – модуль всестороннего сжатия;  $\beta$  – коэффициент теплового расширения;  $\delta_{ik}$  – тензор Кронекера.

Результаты расчета механических напряжений приведены на рис. 2. Нетрудно видеть, что при мощности электрического импульса  $4,3 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> на межфазной границе структуры Al-SiO<sub>2</sub> 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 SiO<sub>2</sub> (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/м<sup>2</sup>; 3,4–  $2,7 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>; 5,6–  $4,3 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>. Пунктирная линия – предел прочности для SiO<sub>2</sub>  $\sigma_B=300$  МПа

Таким образом, результаты численного моделирования показали, что в результате теплового удара на поверхности кристалла SiO<sub>2</sub> возможно достижение механических напряжений сравнимых с пределом прочности.

Экспериментальная проверка осуществлялась на многослойных структурах кремниевая подложка - пленка оксида кремния-алюминиевая пленка (Si-SiO<sub>2</sub>-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 SiO<sub>2</sub> 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/м<sup>2</sup> 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/м<sup>2</sup> 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/м<sup>2</sup> (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 SiO<sub>2</sub> 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 SiO<sub>2</sub> 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 SiO<sub>2</sub> 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/m<sup>2</sup> leads to the formation of microcracks in SiO<sub>2</sub> films. An estimate of the magnitude of mechanical stresses arising in the SiO<sub>2</sub>-Si structure under thermal shock has been carried out. It is shown that, in contrast to SiO<sub>2</sub> 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.