

05;07;11

## НЕТЕРМИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЛИЖНЕГО И СРЕДНЕГО ИК ДИАПАЗОНОВ НА ОКСИДИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ

© А.М.Ховив, И.Я.Миттова, С.И.Дубов

Воронежский государственный университет,  
394693 Воронеж, Россия  
(Поступило в Редакцию 14 марта 1995 г.)

Предпринята попытка оценить нетермическое влияние лазерного излучения среднего и ближнего ИК диапазонов на формирование оксидной пленки на поверхности кремния в процессе его термоокисидирования в атмосфере осушенного кислорода. Показано, что измерение коэффициента отражения лазерного излучения оптического диапазона *in situ* в процессе окисидирования позволяет экспериментально обнаружить нетермическую часть лазерного воздействия на формирование пленки на кремнии. Показано также, что изменение характера влияния ИК лазерного воздействия с ростом толщины оксида с ускоряющего на тормозящее лежит в области толщин оксидов, где наблюдаемый оптический эффект меняет знак.

### Введение

При исследовании лазерно-стимулированного окисидирования поверхности монокристаллического кремния изменение характеристик процесса роста пленки не может быть объяснено только термическим действием излучения. Некоторые авторы указывали на возможность частично нетермического влияния лазерного излучения на формирование оксидной пленки на поверхности кремния при его термоокисидировании [1,2]. Точно же дифференцировать термическое и нетермическое воздействие до сих пор не удавалось. В первом приближении нетермический эффект влияния лазерного излучения можно выделить путем сравнения кинетики окисидирования кремния в лазерно-термическом и термическом режимах при условии, что температуры обоих процессов совпадают [3]. Однако прямого экспериментального исследования этого явления до сих пор не проводилось.

В предложенной работе предпринята попытка оценить нетермическое влияние лазерного излучения среднего и ближнего ИК диапазонов на формирование оксидной пленки на поверхности кремния в процессе его термоокисидирования в атмосфере осушенного кислорода.

Оценку нетермического влияния лазерного излучения на формирование оксидной пленки в процессе термического оксидирования проводили путем измерения коэффициентов отражения излучения маломощного (3 мВт) лазера, работающего в видимом диапазоне ( $\lambda = 632.8$  нм). Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Излучение маломощного лазера направлялось под углом  $70^\circ$  на поверхность исследуемого образца. В качестве образцов использовали пластины монокристаллического кремния марки КЭФ-0.05 (100.), размером  $20 \times 20$  мм. Образцы непосредственно перед экспериментом подвергались перекисно-аммиачной отмывке. В зависимости от поставленной цели кремниевые пластины закреплялись либо на открытом нагревателе для низкотемпературных измерений, либо помещались в печь резистивного нагрева для измерений *in situ* в процессе термооксидирования. В ту же область на пластине направляли излучение мощного ИК лазера ( $\lambda = 1.064$  или  $10.6$  мкм). Излучение мощного лазера модулировалось низкочастотным прерывателем, позволяющим получать импульсы излучения длительностью 5 с с промежутком между импульсами тоже 5 с. Излучение маломощного лазера через систему интерференционных фильтров направлялось в приемную систему, выводящую сигнал на двухкоординатный потенциометр. На абсциссу потенциометра подавали линейную развертку, а на ординату — исследуемый сигнал от фотодиода. Таким образом удавалось набрать необходимую статистику и обеспечить погрешность измерений, не превышающую 5–7% от измеряемой величины. Падающую интенсивность маломощного излучения контролировали на выходе заднего зеркала лазерного резонатора в той же измеряемой схеме, предварительно откалибровывая ее. Учитывая тот факт, что лазерное излучение мощного ИК лазера может создавать в области воздействия некоторый перегрев структуры Si–SiO<sub>2</sub>, предварительно были измерены температурные зависимости коэффициентов отражения от исходной поверхности Si и от структуры Si–SiO<sub>2</sub>. Для определенности

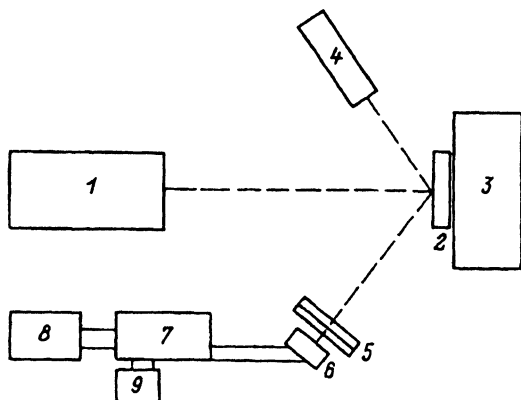


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки для оценки нетермического влияния лазерного излучения.

1 — мощный ИК лазер, 2 — образец, 3 — нагреватель, 4 — маломощный оптический лазер, 5 — система интерференционных фильтров, 6 — фотодиод, 7 — блок усилителя, 8 — двухкоординатный потенциометр, 9 — блок развертки.

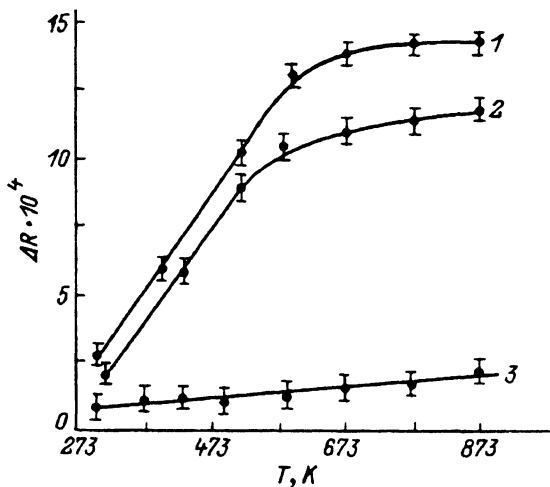


Рис. 2. Зависимость изменения коэффициента отражения при облучении лазерным излучением с  $\lambda = 1.064$  мкм от температуры.

1 — структура Si-SiO<sub>2</sub>, полученная окислением во влажном кислороде, толщина оксида 105 нм; 2 — структура Si-SiO<sub>2</sub>, полученная окислением в сухом кислороде, толщина оксида 107 нм; 3 — кремний с "естественным" оксидом.

плотность мощности ИК лазерного излучения выбирали такой, чтобы в области воздействия создавался перегрев 20 К, контролируемый электронно-оптическим пирометром ЭОП-66 с погрешностью не более 2 К. Как оказалось, такое незначительное изменение температуры не фиксировалось при измерении коэффициентов отражения, если температура изменялась печью резистивного нагрева. Азимут поляризации лазерного излучения с  $\lambda = 632.8$  нм выбирался либо в плоскости падения, либо перпендикулярным к ней. В различных случаях чувствительность проведенных измерений оказывалась максимальной при том или ином азимуте поляризации.

## Результаты

а) Нетермическое влияние ИК лазерного излучения с длиной волны 1.064 мкм. На рис. 2, 3 приведены зависимости изменения коэффициента отражения ( $\Delta R$ ) мало мощного лазера при воздействии ИК лазера в область измерений от температуры образцов и толщины оксидных пленок. Плотность мощности ИК излучения была выбрана из приведенных выше соображений и менялась в интервале 40–80 Вт/см<sup>2</sup>. Как видно,  $\Delta R$  существенно зависит от температуры в низкотемпературной области для структур

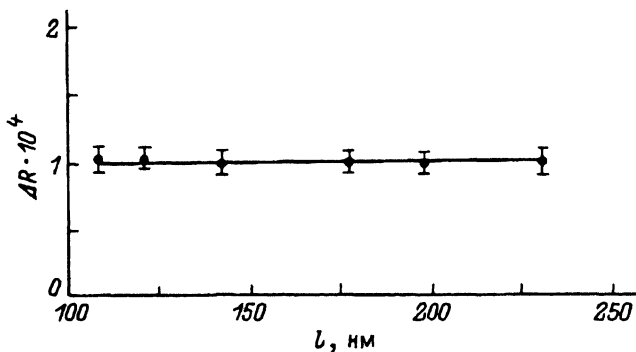


Рис. 3. Зависимость изменения коэффициента отражения от толщины оксидной пленки на кремнии при облучении лазерным излучением с  $\lambda = 1.064$  мкм.

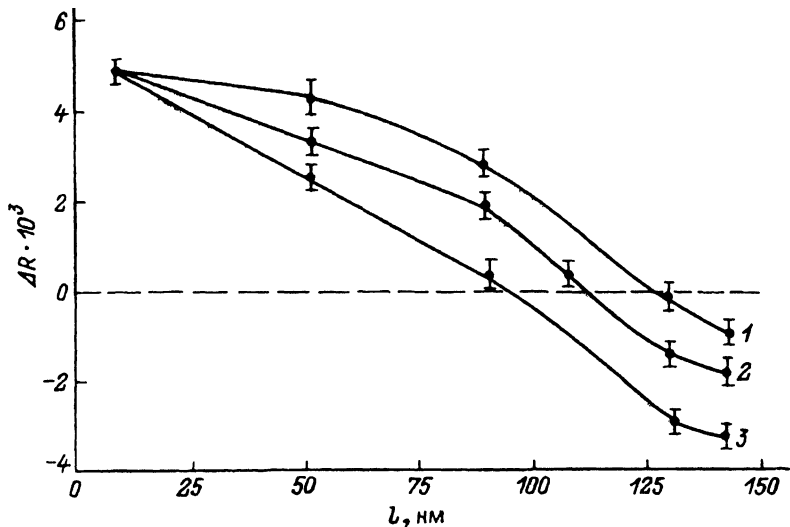


Рис. 4. Зависимость изменения коэффициента отражения под действием лазерного излучения с  $\lambda = 10.6$  мкм от толщины оксидной пленки на кремнии. Температура оксидирования: 1 — 1223, 2 — 1323, 3 — 1373 К.

Si-SiO<sub>2</sub> и слабо зависит от  $T$  для кремния с “естественным” оксидом (исходный образец). Также не обнаруживаются зависимости  $\Delta R$  от толщины оксидной пленки на поверхности кремния.

Следует заметить, что наблюдаемый эффект присутствует при любом азимуте поляризации падающего излучения. Максимальная чувствительность обеспечивается при азимуте, совпадающем с плоскостью падения.

б) Нетермическое влияние ИК лазерного излучения с  $\lambda = 10.6$  мкм. На рис. 4 приведена зависимость  $\Delta R$  (азимут поляризации нормален к плоскости падения) от толщины оксидной пленки при различных температурах. Как видно, в этом случае на зависимостях обнаруживаются следующие особенности: знак  $\Delta R$  сменяется на противоположный с ростом толщины оксидной пленки. Сама величина наблюдаемого эффекта на порядок выше, чем в предыдущем случае. Было найдено, что изменение коэффициента отражения от поверхности плавящего кварца при воздействии ИК излучения  $\Delta R_{\text{SiO}_2} = -0.07 \pm 0.003$  и значении  $R_{\text{SiO}_2} = 0.35$  (без воздействия лазерного излучения  $T = 300$  К). С ростом температуры значение  $\Delta R_{\text{SiO}_2}$  растет и при  $T = 1000$  К достигает величины  $\Delta R_{\text{SiO}_2} = -0.13 \pm 0.02$  при значении  $R_{\text{SiO}_2} = 0.29 \pm 0.03$ .

### Обсуждение результатов

В предыдущих работах авторами было показано, что лазерное излучение с длиной волны 1.064 мкм и указанной ранее плотностью мощности приводит к увеличению скорости роста оксидной пленки на поверхности монокристаллического кремния по сравнению с термооксидированием при соответствующей температуре [4]. Было высказано предположение, что эффект ускорения связан с селективным возбуждением электронной подсистемы и увеличением потока окислителя

к внутренней границе раздела Si-SiO<sub>2</sub> [5]. Сопоставив данные этой работы с результатами исследования кинетики лазерно-термического оксидирования кремния, можно утверждать, что ускорение действительно связано с возбуждением электронной подсистемы Si.

Поскольку энергия кванта лазерного излучения соответствует электронному рассеянию фотонов в твердом теле, то увеличение коэффициентов отражения свидетельствует о ее возбуждении. Это наглядно подтверждают зависимости  $\Delta R$  от  $T$ , поскольку поглощение энергии ИК диапазона кремнием растет с ростом температуры и переходит в насыщение при  $T = 773$  К. Так же ясно, что зависимость  $\Delta R$  от толщины оксида при использовании излучения с  $\lambda = 1.064$  мкм должна отсутствовать, так как в этой области спектра SiO<sub>2</sub> прозрачен.

При облучении поверхности образцов излучением с  $\lambda = 10.6$  мкм было показано, что ускорение роста оксидной пленки с увеличением ее толщины сменяется "тормозящим" эффектом. Причем толщины, при которых происходит смена знака лазерного влияния, закономерно уменьшаются от 130 до 80 нм с ростом температуры. Сопоставив этот результат с данными рис. 4, видим, что смена знака  $\Delta R$  лежит в той же области по толщине и имеет ту же температурную зависимость. Одинаковая зависимость знаков коэффициента отражения и эффекта лазерного влияния на оксидирование кремния свидетельствуют о том, что оба эти явления имеют одну и ту же природу. Поскольку SiO<sub>2</sub> имеет значительный коэффициент поглощения излучения с  $\lambda = 10.6$  мкм, то с ростом толщины пленки растет доля поглощенной в нем энергии излучения, что в свою очередь приводит к увеличению рассеяния распространяющихся в оксиде электронного и ионного потоков. Этим и обусловлено снижение коэффициента отражения и, как следствие, появление эффекта "тормозящего" влияния лазерного излучения.

## Заключение

Поскольку изменения коэффициентов отражения от Si и структуры Si-SiO<sub>2</sub> не могут быть объяснены изменением температуры отражающих объектов под действием лазерного излучения, то вполне справедливо можно предположить, что они связаны с нетермическим влиянием ИК излучения. Корреляция полученных данных с результатами лазерного оксидирования кремния указывает на то, что эти явления взаимосвязаны между собой. Все это дает основание считать, что выбранная методика проведенного эксперимента пригодна для регистрации нетермического эффекта при лазерном оксидировании поверхности кремния.

## Список литературы

- [1] Boyd I.W., Wilson J.B., West J.L. // Thin Solid Films. 1981. Vol. 83. N 2. P. 173.
- [2] Shafer S.A., Lyon S.A. // J. Vac. Sci. Technol. 1982. Vol. 21. N 2. P. 422.
- [3] Угай Я.А., Ховиев А.М., Назаренко И.Н., Дубов С.И. // ЖФХ. 1986. Т. 60. № 6. С. 1554.
- [4] Угай Я.А., Ховиев А.М., Барсукова Л.В., Назаренко И.Н. // ДАН СССР. 1988. Т. 298. С. 670.
- [5] Угай Я.А., Ховиев А.М., Миттова И.Я. и др. // Кинетика и катализ. 1983. Т. 24. № 4. С. 781.