

Уменьшение поглощения в структурах кварц/Si, кварц/Si/SiO₂ и SiC/Si/SiO₂ под влиянием лазерной обработки

© В.Н. Лисоченко[†], Р.В. Конакова[†], Б.Г. Коноплев*, В.В. Кушнир*,
О.Б. Охрименко[¶], А.М. Светличный*

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

* Таганрогский технологический институт Южного федерального университета,
347928 Таганрог, Россия

[†] LIMO — Lissotchenko-Mikrooptik GmbH,
44319 Dortmund, Germany

(Получена 10 июня 2009 г. Принята к печати 23 июня 2009 г.)

Исследовано влияние лазерного излучения на спектры оптического поглощения систем кварц/Si, кварц/Si/SiO₂ и SiC/Si/SiO₂. Выявлены эффекты управления прозрачностью данной структуры.

1. Введение

Лазерный отжиг широко используется для восстановления структуры тонких полупроводниковых слоев, примесного легирования, обработки тонкопленочных материалов. Воздействие лазерного излучения на полупроводники может приводить к изменениям кристаллической структуры, электрофизических и оптических свойств [1]. Кроме того, изучение воздействия лазерной обработки на полупроводниковые структуры позволяет определить характеристики их структуры дефектов [2].

В работе [1] было показано, что воздействие лазерного излучения приводит к существенным перестройкам в структурах SiC/SiO₂ как в диэлектрических пленках, так и в области границы раздела. Причем зависимость изменения электрической прочности диэлектрической пленки от плотности энергии в импульсе носит сложный и немонотонный характер. Предполагается, что изменения электрических свойств структуры SiC/SiO₂ обусловлены дефектами исходной подложки, а также наличием несвязанного углерода на границе раздела SiC/SiO₂, образующегося в процессе окисления карбида кремния. В частности, для пленок SiO₂, полученных методами окисления SiC как в сухом, так и во влажном кислороде, под действием лазерного излучения может наблюдаться уменьшение концентрации неоднородно распределенного углерода за счет его диффузии к поверхности, образования связей Si—O—C и протекания химических реакций, результатом которых является синтез CO из накопленного в процессе окисления границей раздела CO₂. С другой стороны при больших значениях плотности энергии в импульсе могут возникать чисто механические нарушения на границе пленка–подложка [1].

По данным [3,4] известно, что лазерный отжиг может приводить к реструктуризации приповерхностных слоев карбида кремния. В работе [5] было также показано, что в зависимости от параметров лазерного излучения можно достигать улучшения качества поверхности кремния за счет рекристаллизации поликристаллических или аморфных слоев Si.

Особый интерес вызывает возможность с помощью лазерной обработки модифицировать свойства многослойных систем, поскольку при использовании лазерного воздействия имеется возможность селективного отжига отдельных слоев многослойной композиции путем подбора соответствующей длины волны, мощности излучения, что недостижимо при традиционной термообработке [6].

2. Образцы и методика эксперимента

В данной работе было исследовано влияние лазерного излучения на оптическое пропускание ряда структур: кварц/Si, кварц/Si/SiO₂ и структура SiC/Si/SiO₂, где SiC — высокоомный, удельным сопротивлением $\rho > 10^5$ Ом·см. Толщина слоя кремния составляла 0.8–1.0 мкм, двуокиси кремния — 0.1–0.2 мкм, кварца ~ 1000 мкм, SiC — ~ 550 мкм.

Лазерный отжиг производился на универсальной лазерной установке для обработки полупроводников LIMO 100-532/1064-U на основе лазера Nd:YAG (изготовитель — фирма LIMO — Lissotcschenko Mikrooptik GmbH, Германия) на длине волны 532 нм. Длительность импульсов составляла 32 нс. Оптическая система позволяла формировать зону облучения в виде узкой полоски шириной 10 мкм и длиной 60 мм, гомогенность излучения составляла 98.5%. Мощность лазерного излучения варьировалась в диапазоне 20–80 Вт, скорость сканирования составляла 5 мм/с.

Спектры поглощения образцов в области 350–800 нм регистрировались на установке SPECORD UV VIS при комнатной температуре.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Так как оптическая плотность является величиной аддитивной, кривые оптической плотности для кремниевых пленок и пленочных структур Si/SiO₂ получа-

[¶] E-mail: olga@isp.kiev.ua

лись путем вычитания кривых оптической плотности кварцевой или карбидкремниевой подложек из кривых, соответствующих оптической плотности структуры подложка/пленка.

На рис. 1 приведены спектры поглощения структур кварц/Si (рис. 1, *a*), кварц/Si/SiO₂ (рис. 1, *b*) и SiC/Si/SiO₂

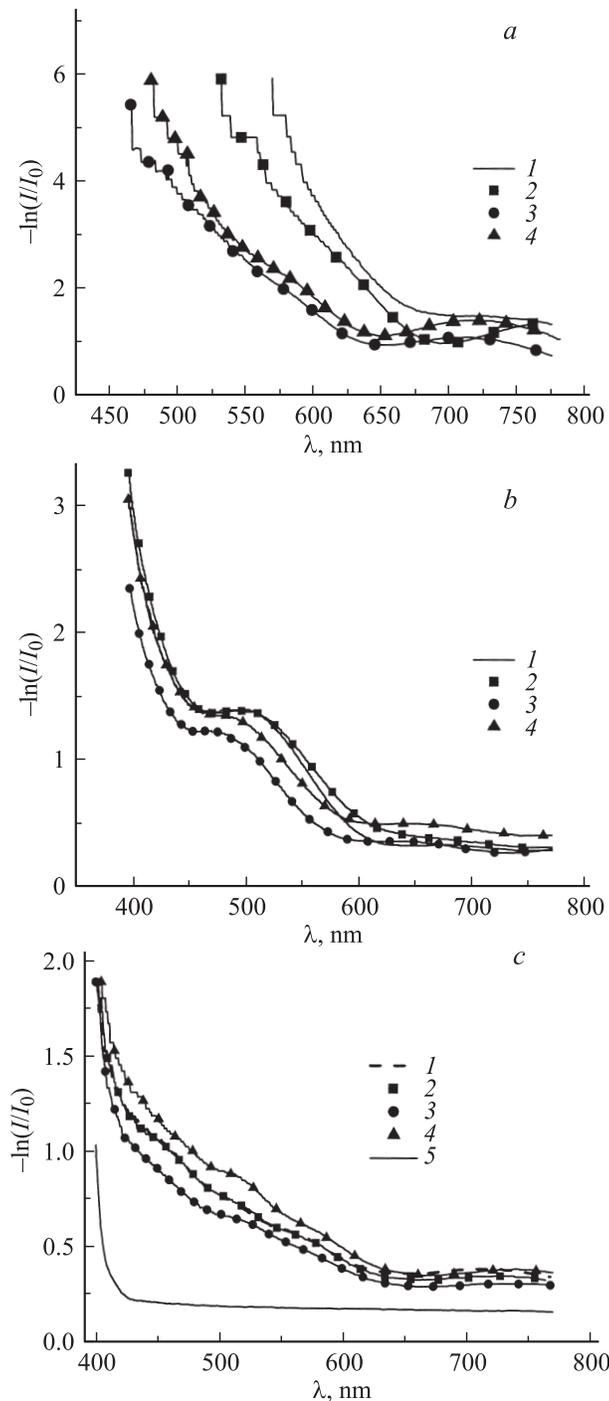


Рис. 1. Спектры поглощения структур: *a* — кварц/Si, *b* — кварц/Si/SiO₂ и *c* — SiC/Si/SiO₂ до (кривые 1) и после лазерной обработки (кривые 2–4). Мощность лазерного излучения, Вт: 2 — 40, 3 — 60, 4 — 80. На рис. *c* кривой 5 показан спектр поглощения подложки SiC.

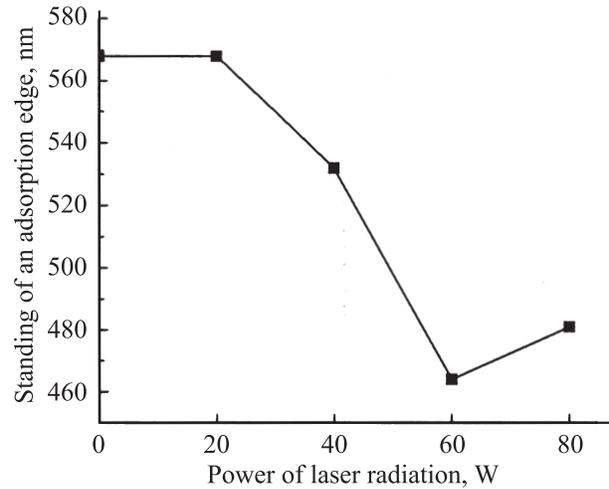


Рис. 2. Зависимость положения края поглощения пленки кремния от мощности лазерного излучения.

(рис. 1, *c*) до и после воздействия лазерного излучения различной мощности. Для сравнения на рис. 1, *c* (кривая 5) приведен спектр поглощения подложки карбида кремния. Кварцевая подложка в области 350–800 нм имеет коэффициент пропускания 90%. Следует отметить, что обработка лазерным излучением мощностью 20 Вт недостаточна и не приводит к каким-либо изменениям в спектрах поглощения исследуемых структур. Как видно из рис. 1, *a*, лазерная обработка структур кварц/Si при мощности лазерного излучения 40–80 Вт приводит к смещению края поглощения кремниевой пленки в область меньших длин волн, а для структур кварц/Si/SiO₂ и SiC/Si/SiO₂ наблюдается изменение оптической плотности (рис. 1, *b*, *c*).

На рис. 2 приведена зависимость изменения положения края поглощения пленки кремния (на кварцевой подложке) от мощности лазерного излучения. Увеличение мощности лазерного излучения до 20 Вт не приводит к сдвигу края поглощения пленки кремния. При увеличении мощности лазерного излучения до 40 Вт наблюдается сдвиг края поглощения кремниевой пленки в область коротких длин волн на ~30 нм. Дальнейшее увеличение мощности лазерного излучения до 60 Вт способствует увеличению сдвига края поглощения образца в область коротких длин волн на ~100 нм по сравнению с исходным образцом. А при мощности лазерного излучения ~80 Вт край поглощения пленки кремния незначительно смещается в область больших длин волн. Поскольку кварцевая подложка в области длин волн 300–850 нм является прозрачной, а, как показали экспериментальные данные, воздействие лазерной обработки не приводит к изменениям в спектре поглощения кварцевой подложки, то сдвиг края поглощения структуры кварц/Si в коротковолновую область обусловлен изменениями, происходящими в пленке кремния. Наблюдаемый сдвиг края поглощения в спектрах исследуемых образцов коррелирует с

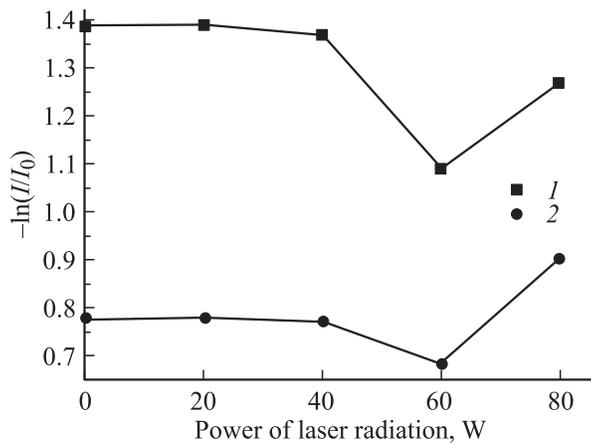


Рис. 3. Пропускание многослойных структур: 1 — кварц/Si/SiO₂ и 2 — SiC/Si/SiO₂ на длине волны 500 нм в зависимости от мощности лазерного излучения.

данными [7], где показано, что лазерное воздействие на тонкие пленки Si на поверхности SiO₂ приводит к аналогичному эффекту за счет рекристаллизации кремния.

В области 400–800 нм поглощение структур кварц/Si/SiO₂ и SiC/Si/SiO₂ обусловлено в основном двухслойной пленкой Si/SiO₂. Поглощение подложки карбида кремния в этой области незначительно (рис. 1, c). Нанесение на карбид кремния послойно структуры Si/SiO₂ приводит к размытию края поглощения. Исследование влияния лазерного излучения на исходный образец карбида кремния показало, что лазерный отжиг не приводит к сдвигу собственного края поглощения и появлению дополнительных полос в спектре поглощения. Поэтому можно считать, что изменения в спектре пропускания исследуемого образца обусловлены процессами, происходящими на границах раздела кварц/Si/SiO₂, SiC/Si/SiO₂, а также непосредственно в слоях Si/SiO₂.

На рис. 3 приведены зависимости изменения оптической плотности образцов от мощности лазерного излучения. Как видно из рис. 3, увеличение мощности лазерного излучения с 20 до 60 Вт приводит к уменьшению поглощения, т. е. к росту прозрачности образца. Однако при увеличении мощности лазерного излучения до 80 Вт наблюдается рост поглощения в исследуемом диапазоне.

Наблюдаемое после лазерного воздействия увеличение коэффициента пропускания для структур кварц/Si, кварц/Si/SiO₂ и SiC/Si/SiO₂ коррелирует с данными [7], где также наблюдалось увеличение пропускания в тонких пленках кремния в результате лазерной обработки. Данный эффект в [7] объяснялся тем, что в результате лазерного отжига происходит фазовый переход кремния из аморфного состояния в поликристаллическое. Дополнительным аргументом в пользу того, что в нашем случае также может происходить рекристаллизация пленки кремния под действием лазерного излучения, является

смещение края поглощения в структуре кварц/Si в коротковолновую область (рис. 1, a), что также коррелирует с данными [7]. На основании вышеизложенного авторы данной работы считают, что для объяснения полученных экспериментальных результатов может быть использована модель, описывающая фазовый переход кремния из аморфного состояния в поликристаллическое под действием лазерного излучения, предложенная в работах [7,8].

Как было показано в [8], фазовый переход от аморфного α -Si к поликристаллическому poly-Si в значительной степени зависит от того, какая часть энергии лазерного луча была поглощена образцом. Согласно [8], в зависимости от степени поглощения лазерного излучения существуют в основном режима кристаллического роста: частичный, почти полный и полный режим плавления. Оптимальные значения мощности лазерного излучения, при которых происходит кристаллизация пленок α -Si, находятся в очень узком энергетическом интервале между режимом частичного плавления и режимом почти полного плавления, так называемое „критическое воздействие“ [8].

При облучении поверхности кремния лазерным излучением из-за эффектов поверхностного отражения поглощается и превращается в тепло только часть лазерного излучения. Температура тонкой пленки начинает увеличиваться пропорционально количеству поглощенной энергии лазерного излучения. Пленка плавится до жидкого состояния при достижении температуры плавления α -Si. После облучения расплав остывает и затвердевает в поликристаллической фазе.

Исследования [8] показали, что температура плавления на поверхности пленки кремния достигается при существенно меньшей мощности лазерного излучения, чем необходимо для плавления нижних слоев, а полное плавление пленки α -Si толщиной 200 нм наблюдалось в том случае, когда мощность лазерного излучения была в ~ 4 раза больше, чем мощность лазера, при которой начиналось плавление поверхностных слоев.

Следовательно, учитывая фактор „критического воздействия“, в рамках модели [8] можно также объяснить немонотонность зависимости коэффициента поглощения многослойной структуры SiC/Si/SiO₂ от мощности лазерного излучения (рис. 3).

4. Заключение

Таким образом, лазерный отжиг можно использовать для низкотемпературного управления прозрачностью многослойной структуры. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что воздействие лазерного излучения на полупроводниковые структуры кварц/Si, кварц/Si/SiO₂ и SiC/Si/SiO₂ приводит к существенным перестройкам как в пленках Si и SiO₂, так и в области границ раздела кварц/Si, SiC/Si и Si/SiO₂.

Список литературы

- [1] В.А. Карачинов. ФТП, **31**, 53 (1997).
- [2] Г.К. Сафаралиев, Ю.Н. Эмиров, М.К. Курбатов, Б.А. Биланов. ФТП, **34**, 929 (2000).
- [3] C. Boutopoulos, P. Terzis, I. Zergioti, A.G. Kontos, K. Zekentes, K. Giannakopoulos, Y.S. Raptis. Appl. Surf. Sci., **253**, 7912 (2007).
- [4] N.I. Cho, Y.M. Kim, J.S. Lim, C. Hong, Y. Sul, C.K. Lim. Thin Sol. Films, **409**, 1 (2002).
- [5] L.A. Marques, L. Pelaz, M. Aboy, J. Barbolla. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, **216**, 57 (2004).
- [6] О.М. Жигалина, Д.Н. Хмеленин, К.А. Воротилов, А.С. Сигов, И.Г. Лебо. ФТТ, **51**, 1398 (2009).
- [7] T. Arguirov, T. Mchedlidze, V.D. Akhmetov, S. Kouteva-Arguirova, M. Kitter, R. Rölver, B. Berghoff, M. Först, D.L. Bätzner, B. Spangenberg. Appl. Surf. Sci., **254**, 1083 (2007).
- [8] Zhijun Yuan, Qihong Lou, Jun Zhou, Jingxing Dong, Yunrong Wei, Zhijiang Wang, Hongming Zhao, Guohua Wu. Opt. Laser Technol., **41**, 380 (2009).

Редактор Т.А. Полянская

Reduction of absorption in structures quartz/Si, quartz/Si/SiO₂ and SiC/Si/SiO₂ under influence of laser processing

V.N. Lissotschenko[†], R.V. Konakova, B.G. Konoplev*, V.V. Kushnir*, O.B. Okhrimenko, A.M. Svetlichnyi*

Lashkarev Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

* Taganrog Institute of Technology,
Southern Federal University,
3247928 Taganrog, Russia

[†] LIMO — Lissotchenko–Mikrooptik GmbH,
44319 Dortmund, Germany

Abstract Influence of laser radiation on spectra of optical absorption of system quartz/Si, quartz/Si/SiO₂ and SiC/Si/SiO₂ has been investigated. Effects of management are revealed by a transparency of the given structure.