

Формирование SiO_x -слоев при плазменном распылении Si- и SiO_2 -мишеней

© А.Н. Карпов, Д.В. Марин*, В.А. Володин*, J. Jedrzejewski⁺, Г.А. Качурин*, E. Savir⁺, Н.Л. Шварц^{¶*}, З.Ш. Яновицкая*, Y. Goldstein⁺, I. Balberg⁺

Новосибирский государственный университет,
630090 Новосибирск, Россия

* Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,
630090 Новосибирск, Россия

⁺ Racah Institute of Physics, Hebrew University,
91904 Jerusalem, Israel

(Получена 8 октября 2007 г. Принята к печати 17 октября 2007 г.)

При совместном распылении в аргоновой плазме разнесенных в пространстве Si- и SiO_2 -мишеней осуществлялось осаждение слоев SiO_x переменного состава на кремниевые пластины. Координатные зависимости толщины и показателя преломления отдельно осажденных Si- и SiO_2 -слоев, а также слоя SiO_x , полученного при совместном распылении мишеней, определялись с помощью оптических методик. Показано, что состав SiO_x -слоя не соответствует простой сумме толщин отдельно осажденных Si- и SiO_2 -слоев. Выполнены расчеты координатных зависимостей толщины Si- и SiO_2 -слоев. Для совмещения расчетных и экспериментальных данных необходимо предположить, что при совместном распылении не менее 10% кремния превращается в диоксид. Сопоставление координатных зависимостей ИК-поглощения в SiO_2 - и SiO_x -слоях с экспериментальными данными по эллипсометрии подтвердило наличие избыточного кислорода в SiO_x -слое. С учетом такого частичного окисления распыляемого кремния рассчитаны кривые равного состава в плоскости подложки. После отжига SiO_x -слоя при 1200°C , в заранее рассчитанной области пластины наблюдалась фотолюминесценция, связанная с появлением квантово-размерных нанокристаллитов Si. Она была наиболее интенсивна при $x = 1.78 \pm 0.3$, что близко к оптимальному составу при ионно-лучевом синтезе нанокристаллов.

PACS: 61.46.Bc, 78.55.-m, 78.67.Bf, 81.15.Cd

1. Введение

Плазменное осаждение является одним из самых простых методов формирования светоизлучающих нанокристаллов кремния. Осаждение SiO_x -слоев путем совместного распыления разнесенных в пространстве SiO_2 - и Si-мишеней позволяет получать слои, толщина и состав которых зависят от координат на подложке [1]. Достоинство таких SiO_x -слоев с x в диапазоне $0 \leq x \leq 2$ состоит в том, что участки с разным составом и толщиной получены в одном эксперименте, что позволяет наиболее точно определять зависимости оптических и электрических свойств от содержания кремния и толщины слоя. Интерес к слоям SiO_x связан с наблюдением в них фотолюминесценции (ФЛ) в видимой области спектра. Спектральное положение максимума ФЛ зависит от содержания кремния. Возникновение ФЛ после высокотемпературного (около 1100°C) отжига (ВТО) связывают с образованием в пленке нанокристаллитов кремния (*нк-Si*) [2–4]. Связь между наличием *нк-Si* и ФЛ в области 700–900 нм установлена, однако механизм формирования нанокристаллов в SiO_x -слоях пока недостаточно ясен. В последнее время появились предположения [5,6] о важной роли монооксида кремния как в процессе переноса избыточного кремния, так и в формировании *нк-Si*. В пользу такого предположения свидетельствует необходимость ВТО при температурах,

где происходит образование значительного количества SiO в системе Si– SiO_2 . Чтобы управлять интенсивностью ФЛ и положением ее пиков, нужно знать закономерности процесса формирования *нк-Si* и оптимальный состав SiO_x -слоя. Данные по оптимальному составу слоев, отвечающему максимальной ФЛ, достаточно разноречивы [7,8].

При совместном распылении разнесенных в пространстве Si- и SiO_2 -мишеней определение состава SiO_x -слоя оказывается нетривиальной задачей. Простое сложение толщин отдельно осажденных слоев Si и SiO_2 дает зависимость состава от координаты с большой погрешностью, поскольку распыляющие характеристики плазмы различаются при работе одной и двух мишеней. В данной работе определялись зависимости толщины и состава SiO_x -слоя от координат на кремниевой пластине диаметром 100 мм при распылении Si- и SiO_2 -мишеней аргоновой плазмой. Расчеты толщины и состава в зависимости от координат на подложке выполнены численным интегрированием потоков, попадающих на подложку с разных участков мишеней. Толщина и показатель преломления отдельно осажденных Si- и SiO_2 -слоев, а также SiO_x -слоя, полученного при совместном распылении мишеней, определялись методами эллипсометрии и интерференционной микроскопии. Координаты с оптимальным составом SiO_x -слоя определялись по максимуму ФЛ в области 800 нм, возникающей после ВТО. Содержание кислорода в оптимальной области определялось из сопоставления расчетных и

[¶] E-mail: natasha@spy.isp.nsc.ru

экспериментальных данных и контролировалось по ИК поглощению в области $500\text{--}1500\text{ см}^{-1}$.

2. Методика эксперимента

На рис. 1 показано взаимное расположение мишеней и подложки при одновременном распылении (сораспылении) в аргоновой плазме Si- и SiO-мишеней. (Плавленный кварц 99.995% частоты, плотность $2.17\text{--}2.66\text{ г/см}^3$, монокристаллический кремний с удельным сопротивлением $0.005\text{--}0.020$, Kurt J. Lesker Company). Полированные пластины — подложки Si(001) марки КЭФ-4.5, диаметром 100 мм перед осаждением промывались толуолом, спиртом, деионизованной водой и просушивались в потоке азота. Снятие естественного окисла не проводилось.

Форма распыляемой площадки мишени представляла собой кольцо, внешний и внутренний радиусы которого измерялись и использовались в расчетах. На рисунке указаны также размеры и расстояния, использованные в эксперименте. При таком расположении мишеней и подложки проводилось распыление либо одной из двух, либо обеих мишеней. В результате получались либо SiO₂-, либо Si-слои переменной толщины, либо SiO_x-слои переменного состава и толщины. Для контрольных измерений использовались также слои, выращенные на кварцевых подложках. В дальнейшем пластины разрезались на образцы, на которых проводились эллипсометрические, поглощение ИК и ФЛ измерения.

Вакуумная установка перед началом распыления откачивалась до давления 10^{-6} Торр, затем в камеру

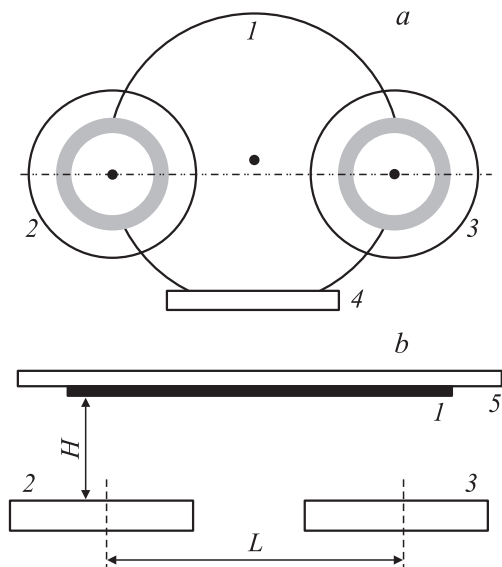


Рис. 1. Взаимное расположение подложки и мишеней при получении SiO_x-слоев, *a* — вид снизу, *b* — разрез по линии центров мишеней: 1 — подложка, 2 — Si-мишень, 3 — SiO₂-мишень, 4 — держатель, 5 — держатель. *H* — минимальное расстояние между мишенью и подложкой, *L* — расстояние между центрами мишеней. Серым цветом отмечены кольцеобразные площадки, с которых идет распыление.

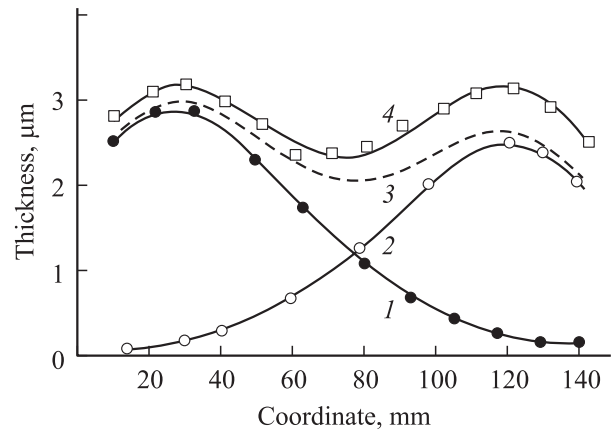


Рис. 2. Экспериментальные координатные зависимости толщины слоев на кварцевых подложках: отдельно осажденные слои Si (1) и SiO₂ (2), слой SiO_x (4), пунктирной линией 3 показана сумма толщин отдельно осажденных слоев.

напускался аргон до давления $8 \cdot 10^{-3}\text{--}1 \cdot 10^{-2}$ Торр. Напряжения на обе мишени подавалось одинаковыми и равными 300 ± 20 В, так, чтобы мощность, рассеиваемая на каждой из мишеней, составляла 60 Вт. Подложка специально не подогревалась.

Толщина и показатель преломления Si-, SiO₂- и SiO_x-слоев измерялись методом эллипсометрии [9,10]. Эллипсометрические измерения проводились на длине волны света 632.8 нм с помощью автоматического сканирующего эллипсометра ЛЭФ-801 „Микроскан“, а также с помощью ручного эллипсометра 09ИТ-1.7-005 при трех углах падения луча. Измерения ФЛ проводились при возбуждении лазером с длиной волны 337 нм на монохроматоре СДЛ-1 с ФЭУ-79, работающем в режиме счета фотонов. Измерения ИК пропускания проводились с помощью фурье-спектрометра (Infracum FT-801, „LUMEX-SIBERIA“ Ltd. R&D and Production Company), который позволяет проводить исследования в диапазоне $500\text{--}8000\text{ см}^{-1}$, сечение пучка составляло $2 \times 4\text{ мм}$.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены координатные зависимости толщины слоев, выращенных на узких кварцевых подложках ($130 \times 10 \times 1\text{ мм}$), расположенных вдоль линии центров мишеней. Слой осаждался сквозь прорезь в держателе шириной 3 мм. С помощью интерференционного микроскопа были измерены зависимости толщины от координаты $d(X)$ для слоев диоксида и кремния, а также для слоя SiO_x, осажденного при тех же значениях напряжения и мощности на мишенях, которые использовались при раздельном осаждении слоев. Для всех экспериментов $L = 96\text{ мм}$, $H = 61\text{ мм}$ (рис. 1). Следует отметить, что при раздельном осаждении максимальное значение толщины слоя диоксида меньше, чем слоя кремния, т.е. скорости роста слоев диоксида V_d и

кремния V_{Si} различаются между собой, $V_{\text{Si}}/V_d \approx 1.20$. Пунктиром на рис. 2 показана простая сумма толщин отдельно осажденных слоев Si и SiO_2 . Кривая 4 соответствует толщине сораспыленного SiO_x -слоя, которая выше суммы толщин на 10–20% при всех значениях координат. Видно, что сораспыленный слой в середине имеет наименьшую толщину.

Для выяснения причин расхождения кривых 3 и 4 на рис. 2 был проведен дополнительный эксперимент с заменой мишени диоксида на кремниевую. Оказалось, что и в этом случае толщина слоя при совместном распылении двух мишеней выше, чем простая арифметическая сумма отдельно осажденных слоев. Это означает, что при одновременном включении обеих мишеней происходит увеличение скорости распыления обеих мишеней. Это увеличение не одинаково для двух мишеней и несколько меняется от опыта к опыту. При подгонке толщины SiO_x -слоя (рис. 2) с учетом изменения потоков по формуле $d_{\text{SiO}_x} = m_1 \cdot d_{\text{Si}} + m_2 \cdot d_{\text{SiO}_2}$ были найдены подгоночные коэффициенты $m_1 = 1.08$, $m_2 = 1.27$. С учетом этих подгоночных коэффициентов отношение скоростей осаждения $V_{\text{Si}}/V_{\text{SiO}_2}$ при совместном распылении считалось равным 1.10 ± 0.05 .

Для приведенной на рис. 1 геометрии расположения мишеней и подложки были проведены расчеты толщины и состава осажденных слоев в зависимости от координат на подложке путем численного интегрирования потоков, приходящих на подложку с распыляемых участков мишеней, по формуле

$$j(\rho, \alpha) = J_0 \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_1} f(R) \cos^2 \theta (2\pi \cdot R^2)^{-1} r \cdot dr \cdot d\varphi, \quad (1)$$

где ρ, α — полярные координаты на подложке, r и φ — полярные координаты в плоскости мишени, θ — угол, под которым видна малая площадка подложки с данной площадки мишени, R — расстояние между этими площадками, $f(R)$ — функция распыления в виде $f(R) = \exp(-a \cdot R)$, J_0 ($\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$) — константа, определяемая условиями распыления.

Подгоночными параметрами являются J_0 и a в $f(R)$. Первая величина определялась из максимальной толщины в точке против центра мишени, а последняя — из координатных зависимостей толщины отдельно осажденных слоев. Из совмещения расчетных кривых с кривыми 1 и 2 на рис. 2 было найдено $a_{\text{SiO}_2} = 2.18 \cdot 10^{-2}$; $a_{\text{Si}} = 3.33 \cdot 10^{-2}$ (мм^{-1}).

На рис. 3 показаны расчетные зависимости $d(X)$ вдоль линии центров при совместном распылении для двух значений расстояния между подложкой и мишенями. Предполагалось, что скорость осаждения обоих веществ одинакова, а общая толщина слоя определяется суммой толщин слоев. Величина a бралась равной a_{SiO_2} . Видно, что в пространстве между мишенями при большом расстоянии до подложки толщина SiO_x -слоя должна иметь плоский участок. При малом расстоянии имеется

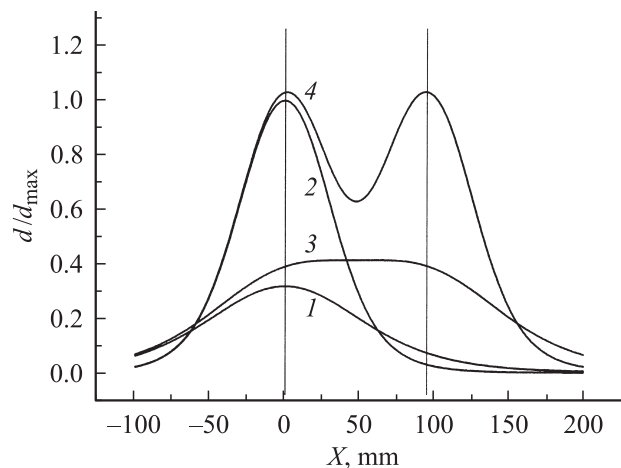


Рис. 3. Изменения толщины вдоль линии центров при распылении из одной (кривые 1 и 2) и двух мишеней (кривые 3 и 4): 1, 3 — $H = 114$ мм; 2, 4 — $H = 61$ мм. За d_{max} принята максимальная толщина на кривой 2.

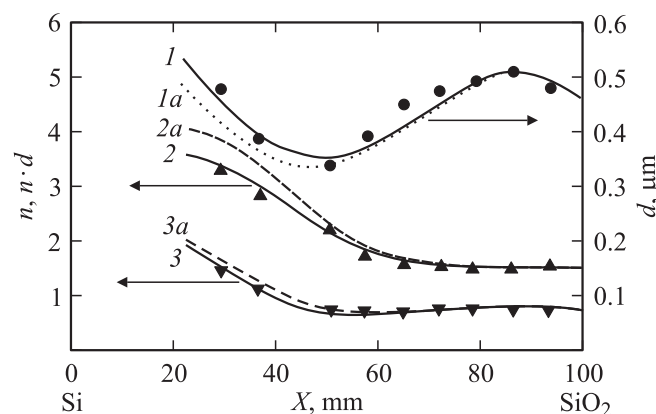


Рис. 4. Координатные зависимости толщины d (кривая 1), показателя преломления n (кривая 2) и $n \cdot d$ (кривая 3) для SiO_x -слоя в зависимости от расстояния вдоль линии центров мишеней: точки — данные для $d(X)$ и $n(X)$, полученные из эллипсометрических измерений по трем углам; кривые — результаты расчетов с учетом превращения 10% кремния в диоксид (пунктиром показаны кривые 1a–3a без учета избыточного кислорода), $H = 61$ мм.

минимум толщины против середины линии центров мишеней.

Эллипсометрические измерения SiO_2 - и SiO_x -слоев на Si-подложках проводились на автоматическом эллипсометре при угле падения луча 65° и на ручном эллипсометре при трех значениях угла падения лазерного луча: 45° , 56.6° и 70° . Данные по толщине $d(X)$ и показателю преломления n обоих приборов хорошо совпали для SiO_2 -слоя переменной толщины, показатель преломления этого слоя оказался равным 1.475 ± 0.005 . Для раздельного определения $d(X)$ и $n(X)$ в SiO_x -слое использовались данные преимущественно трехугловых измерений. Расчетные кривые подгонялись под эти данные.

На рис. 4 точками показаны значения толщины d и показателя преломления n SiO_x -слоя и их произведения $n \cdot d$, полученные из эллипсометрических измерений, а сплошными линиями — результаты расчетов этих же величин, наилучшим образом совпадающие с экспериментом. Максимальная толщина осажденного диоксида $d_{\max} = 497$ нм. На „кремниевом краю“ слоя измерения были невозможны из-за маленькой разницы свойств осажденного слоя и подложки. Поэтому экспериментальное значение максимальной толщины в этой области оценивалось из соотношения потоков. Зависимость $d(X)$ для SiO_x -слоя определялась как сумма толщин слоев кремния и диоксида, рассчитанных по формуле (1), с указанными выше значениями a_{SiO_2} и a_{Si} .

Показатель преломления рассчитывался по соотношению Бруггемана [11]:

$$c_{\text{Si}} \frac{\varepsilon_{\text{Si}} - \varepsilon}{\varepsilon_{\text{Si}} + 2\varepsilon} + c_{\text{SiO}_2} \frac{\varepsilon_{\text{SiO}_2} - \varepsilon}{\varepsilon_{\text{SiO}_2} + 2\varepsilon} = 0, \quad (2)$$

где c — доля соответствующего вещества в смеси, ε — диэлектрическая постоянная соответствующих веществ и смеси. При расчете показателя преломления показателем поглощения пренебрегалось, так как в измеренной области величина показателя поглощения не превышала 0.1, $\varepsilon_{\text{Si}} = (4.4)^2$, $\varepsilon_{\text{SiO}_2} = (1.47)^2$.

Как видно из рис. 4, показатель преломления в широкой области координат слабо увеличивается с ростом содержания кремния. Совместить расчетные кривые с экспериментальными данными одновременно для d и n удалось в предположении, что в процессе совместного распыления часть осаждаемого кремния окисляется. При построении расчетных кривых толщина SiO_x -слоя вычислялась по формуле, предполагающей, что часть δ кремния превращается в диоксид:

$$d = d_{\text{SiO}_2} + (1 - \delta)d_{\text{Si}} + 2\delta \cdot d_{\text{Si}}. \quad (3)$$

Толщина слоя диоксида примерно в 2 раза толще слоя кремния при одинаковой концентрации атомов кремния. Варьируя величину δ , удалось совместить расчетные кривые и экспериментальные точки при $\delta = 0.1$.

Используя связь между процентным содержанием кремния C_{Si} и величиной x : $C_{\text{Si}} = 100\% \cdot (2 - x)/2$, можно было определить величину x для любой точки пластины. На рис. 5, *a* приведены рассчитанные линии равного состава (равного x) и линии равной толщины для SiO_x -слоя на Si-пластине.

На рис. 5, *b* приведены спектры ФЛ (сплошные линии), измеренные после отжига в азоте (1200°C , 50 мин) на той же пластине в точках А, В и С, положение которых указано стрелкой на рис. 5, *a*. ФЛ обусловлена формированием после отжига квантово-размерных nk -Si. Максимальная интенсивность наблюдалась в точке В, точки А и С лежат по обе стороны от точки В на расстоянии 3 мм. Для сравнения пунктиром приведена ФЛ nk -Si для SiO_x -слоя, полученного ионной имплантацией кремния в термический диоксид толщиной 75 нм ($V = 25$ кВ, доза — $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, $n = 1.6$, $x \approx 1.75$),

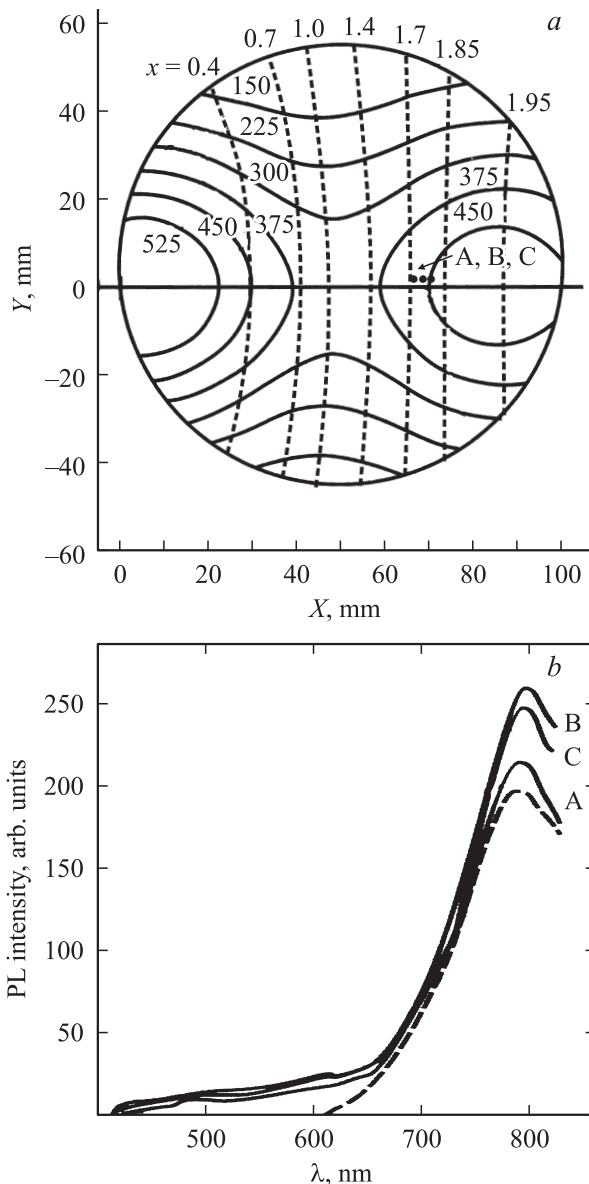


Рис. 5. *a* — рассчитанные линии равного состава x (штриховые) и равной толщины d (нм, сплошные) SiO_x -слоя на Si-пластине; *b* — ФЛ, измеренная в точках А, В, С пластины; штриховая линия — ФЛ, измеренная на образце с термическим слоем SiO_2 после ионной имплантации кремния ($x \approx 1.75$).

после отжига (1100°C , 30 мин). Максимальная ФЛ в точке В ($X = 82$ мм) соответствует $x = 1.78 \pm 0.03$, что близко к оптимальным концентрациям избыточного кремния по данным ионно-лучевого синтеза квантово-размерных nk -Si.

Для проверки присутствия избыточного кислорода в SiO_x -слое были проведены измерения ИК пропускания в спектральной области, где наблюдаются пики поглощения, связанные с колебательными степенями свободы Si-O-связей (500 – 1500 см^{-1}). На рис. 6 представлены спектры ИК пропускания SiO_2 - и SiO_x -слоев. На рис. 6, *a* приведены спектры диоксида в 7 точках с различной

координатой X . На всех спектрах присутствуют три пика 1200, 1080 и 810 см^{-1} , характерные для колебаний мостикового кислорода [12]. Видно, что величина основного пика поглощения вблизи 1080 см^{-1} систематически уменьшается с уменьшением толщины слоя диоксида, а его положение практически не меняется. По величине этого пика определяется содержание кислорода в кремнии [13], так как концентрация кислорода пропорциональна коэффициенту поглощения в максимуме пика.

На рис. 6, *b* представлены спектры SiO_x -слоев, измеренных в 7 точках вдоль линии центров примерно с теми же значениями координаты X , что и на рис. 6, *a*. Видно, что по мере приближения к кремниевому концу основной пик сдвигается в сторону меньших частот и расширяется. Наиболее сильные изменения происходят в „кремниевой половине“ пластины (кривые 5–7).

На рис. 7 построены зависимости величины основного пика поглощения вблизи 1080 см^{-1} от координат для пластин с SiO_2 -слоем (кривая 1) и с SiO_x -слоем (кривая 2).

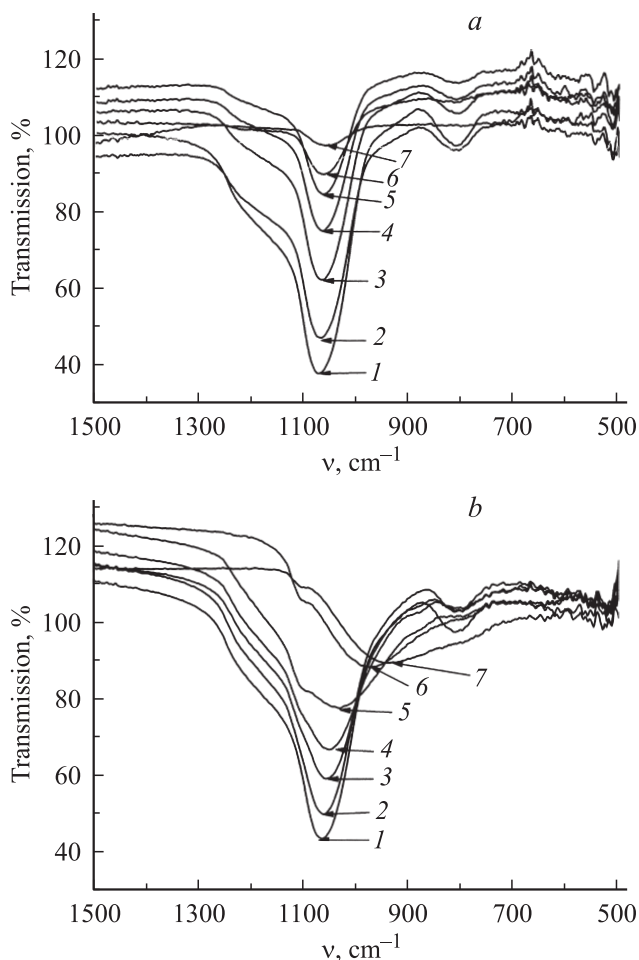


Рис. 6. ИК спектры пропускания слоев: *a* — SiO_2 , *b* — SiO_x при различных значениях расстояния X от центра кварцевой мишени, мм: 1 — 10, 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 60, 6 — 70, 7 — 90 (значения X для кривых на рис. *a* и *b* одинаковы с точностью ± 2 мм).

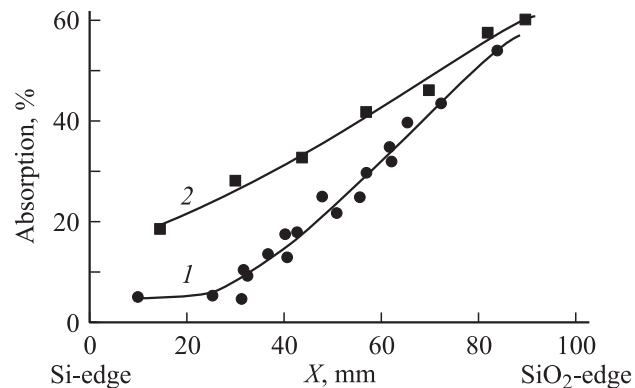


Рис. 7. Координатные зависимости величины основного пика ИК-поглощения в слое SiO_2 — 1, в слое SiO_x — 2.

Смещение и расширение основного пика на рис. 6, *b* свидетельствуют о том, что до отжига SiO_x -слой не представляет собой смесь двух фаз Si и SiO_2 , так как в этом случае рост отношения Si: SiO_2 вызвал бы простое уменьшение интенсивности при неизменном положении пика. Вероятно, SiO_x -слой является смесью различных оксидов и кремния, соотношение между которыми меняется с координатой. Сдвиг основного пика может быть вызван, например, присутствием монооксида SiO, максимум поглощения которой лежит около 1000 см^{-1} [14], а также ослаблением связей Si–O в рыхлом неотожженном слое. При увеличении длины связи на 0.01 \AA основной пик смещается в красную сторону на 43 см^{-1} [15]. Судя по интенсивности основного пика (рис. 7, кривая 2), количество кислорода на „кремниевом конце“ слоя больше, чем поставляется распылением кварцевой мишени.

Сопоставление с расчетом видимой интерференции в слое SiO_x также указывает на повышенное содержание в нем избыточного кислорода. Положение интерференционных пиков подтверждает, что этот слой обладает более низким показателем преломления, чем простая сумма осаждаемых Si- и SiO_2 -слоев. Особенно это заметно на „кремниевом“ конце слоя, где недостаточно даже предположения, что 10% осаждаемого кремния превращается в диоксид. В области наблюдения ФЛ ($X = 82\text{ мм}$) избыток кислорода, хотя и небольшой, также заметен по данным ИК-поглощения (рис. 7). Причина появления в слоях SiO_x избыточного кислорода пока не ясна. О похожем явлении сообщалось в работе [16], где SiO_x -слой, осажженный термическим испарением SiO-мишени, имел $x = 1.3$ вместо 1, т.е. происходило самопроизвольное обогащение слоя кислородом.

4. Заключение

Методом распыления в аргоновой плазме разнесенных в пространстве мишеней Si и SiO_2 на кремниевых пластинах получены слои SiO_x переменной толщины и состава. Рассчитаны толщина и состав слоя SiO_x

для экспериментального расположения мишеней и скоростей осаждения Si и SiO₂. Проведенные исследования методами эллипсометрии, оптического поглощения и ФЛ показывают, что в SiO₂-слоях присутствует избыточный кислород. Картина интерференции SiO_x-слоя также свидетельствовала о дополнительном обогащении кислородом SiO₂-слоя, особенно заметном на „кремниевом конце“. Показано, что оценка толщины и состава SiO_x-слоя как суммы осаждаемых слоев Si и SiO₂ не является точной. Оптимальное значение x , при котором наблюдается максимальная интенсивность ФЛ *нк*-Si, оценено как $x = 1.78 \pm 0.03$. Это значение хорошо совпало с оптимальной величиной, полученной для ионно-имплантированных образцов, где количество и распределение избыточного кремния известны с большей точностью.

Авторы выражают благодарность В.Г. Половинкину за помощь в обсуждении результатов эллипсометрических измерений.

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 05-02-16455, МНТИ № 06-02-72003).

Список литературы

- [1] M. Dovrat, Y. Goshen, J. Jedrzejewski, I. Balberg, A. Sa'ar. *Phys. Rev. B*, **69** (15), 5311 (2004).
- [2] P. Photopoulos, A.G. Nassiopoulou, D.N. Kouvatso, A. Travlos. *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 3588 (2000).
- [3] L. Komenkova, N. Korsunskaya, V. Yuhimchuk, B. Junayev, T. Torchynskaya, A.V. Hernandez, A. Many, Y. Goldstein, E. Savir, J. Jedrzejewski. *J. Luminesc.*, **102–103**, 705 (2003).
- [4] G.A. Kachurin, I.E. Tyschenko, K.S. Zhuravlev, N.A. Pazdnikov, V.A. Volodin, A.K. Gutakovskiy, A.F. Leier, W. Skorupa, R.A. Yankov. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B*, **122**, 571 (1997).
- [5] T. Takahashi, S. Fukatsu, K.M. Itoh, M. Uematsu, A. Fujiwara, H. Kageshima, Y. Takahashi, K. Shiraishi. *J. Appl. Phys.*, **93**, 3674 (2003).
- [6] K. Furukawa, Y. Liu, H. Nakashima, D. Gao, K. Uchino, K. Muraoka, H. Tsuzuki. *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 725 (1998).
- [7] Г.А. Качурин, А.Ф. Лейер, К.С. Журавлев, И.Е. Тысченко, А.К. Гутаковский, В.А. Володин, В. Скорупа, Р.А. Янков. *ФТП*, **32** (11), 1371 (1998).
- [8] D. Comedi, O.H.Y. Zalloum, E.A. Irving, J. Wojcik, T. Roschuk, M.J. Flynn, P. Mascher. *J. Appl. Phys.*, **99** (2), 3518 (2006).
- [9] А.В. Ржанов, К.К. Свиташев, А.И. Семенов, Л.В. Семенов, В.К. Соколов. *Основы эллипсометрии* (Новосибирск, Наука, 1978).
- [10] Р. Аззам, Р. Башара. *Эллипсометрия и поляризованный свет* (М., Мир, 1981).
- [11] D.E. Aspnes. *Thin Sol. Films*, **89**, 249 (1982).
- [12] C.T. Kirk. *Phys. Rev. B*, **38**, 1255 (1988).
- [13] В.М. Бабич, Н.И. Блещан, Е.Ф. Венгер. *Кислород в монокристаллах кремния* (Киев, Интерпресс ЛТД, 1997).
- [14] W.A. Pliskin, H.S. Lehman. *J. Electrochem. Soc.*, **112**, 1013 (1965).

- [15] F. Giustino, A. Pasquarello. *Phys. Rev. Lett.*, **95** (18), 7402 (2005).
- [16] В.А. Данько, И.З. Индутный, В.С. Лысенко, И.Ю. Майданчук, В.И. Минько, А.Н. Назаров, А.С. Ткаченко, П.Е. Шепелявый. *ФТП*, **39**, 1239 (2005).

Редактор Л.В. Беляков

SiO_x layers formation during Si and SiO₂ targets co-sputtering

A.N. Karpov, D.V. Marin*, V.A. Volodin*,
J. Jedrzejewski⁺, G.A. Kachurin*, E. Savir⁺,
N.L. Shwartz*, Z.Sh. Yanovitskaya*,
Y. Goldstein⁺, I. Balberg⁺

Novosibirsk State University,
630090 Novosibirsk, Russia

* Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia

⁺ Racah Institute of Physics, Hebrew University,
91904 Jerusalem, Israel

Abstract Deposition of SiO_x layers with varying composition on silicon substrates was realized using co-sputtering in argon plasma of Si and SiO₂ spaced targets. Several optical techniques were used for measuring coordinate dependences of thickness and refractive index of separately deposited Si and SiO₂ and co-sputtered SiO_x layers. It was demonstrated that composition of SiO_x layer was not equal to direct sum of individual thicknesses of separately deposited Si and SiO₂ layers. Calculations for determination of thickness dependences of Si and SiO₂ layers on coordinates were fulfilled. To fit calculated and experimental data one has to suggest that during co-sputtering no less than 10% of Si is converted into dioxide. Comparison of coordinate dependences of IR absorption in SiO₂ and SiO_x layers with experimental ellipsometric data confirmed the presence of excess oxygen in SiO_x layer. Taking into account partial oxidation of sputtered silicon, isolines of equal composition in substrate plane were calculated. After annealing of SiO_x layer at 1200°C, photoluminescence resulting from Si nanocrystals was observed in wafer area, predicted by calculations. PL intensity was maximal at $x = 1.78 \pm 0.3$, that is close to optimal composition for nanocrystals formed using ion implantation.