

Влияние электрического поля при получении пленок $a\text{-SiO}_x : \text{H}(\text{Er}, \text{O})$ методом магнетронного распыления на постоянном токе на их состав и интенсивность фотолюминесценции ионов эрбия

© Ю.К. Ундалов[¶], Е.И. Теруков, О.Б. Гусев, В.М. Лебедев⁺, И.Н. Трапезникова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константина Российской академии наук,
188300 Гатчина, Россия

(Получена 23 января 2008 г. Принята к печати 28 января 2008 г.)

Исследовано влияние электрического поля на элементный состав и фотолюминесценцию пленок аморфного гидрогенизированного кремния, легированного эрбием и кислородом ($a\text{-SiO}_x : \text{H}(\text{Er}, \text{O})$), при получении их методом магнетронного распыления на постоянном токе. Изучались две серии пленок в зависимости от напряженности электрического поля магнетрона, от площади металлической эрбиевой мишени и от содержания кислорода в рабочей камере. Первая серия пленок была получена при электрически изолированном подложкодержателе, вторая — при положительном потенциале на подложкодержателе относительно катода. Показано, что, хотя характер изменения элементного состава и интенсивность фотолюминесценции ионов эрбия Er^{3+} в пленках двух серий значительно различаются, в обоих случаях они, в итоге, определяются процессами распыление–окисление Si- и Er-мишеней, являющихся катодом.

PACS: 78.55.Qr, 81.05.Gc, 81.15.Jj

1. Введение

Гидрогенизированный аморфный кремний, легированный эрбием и кислородом, $a\text{-SiO}_x : \text{H}(\text{Er}, \text{O})$, при межзонной оптической накачке может излучать на длине волны $\lambda = 1.54$ мкм, соответствующей минимальному поглощению в современном оптическом волокне. Интенсивность фотолюминесценции ионов эрбия Er^{3+} ($I_{\text{PL}}^{\text{Er}}$), обусловленной оптическими переходами иона эрбия из первого возбужденного состояния ${}^4I_{13/2}$ в основное ${}^4I_{15/2}$, в аморфном гидрогенизированном кремнии слабо зависит от температуры в области от гелиевой до комнатной температур, что делает этот материал привлекательным для практического использования.

Проведенные нами исследования [1,2] позволили оптимизировать процесс получения пленок $a\text{-SiO}_x : \text{H}(\text{Er}, \text{O})$ магнетронным распылением на постоянном токе (dc-магнетронный метод) и значительно увеличить квантовый выход фотолюминесценции (ФЛ) ионов эрбия. В настоящее время внешний квантовый выход ФЛ эрбия на длине волны 1.54 мкм при 300 К в полученных нами пленках достигает 0.5%, что на сегодняшний день является наибольшим для ФЛ эрбия в полупроводниковых матрицах.

Важно отметить, что эксперименты [1,2] проводились при электрически изолированном от электродов источнике напряжения подложкодержателя. В то же время влияние электрического поля E_{ac} в рабочем пространстве магнетрона между полым кольцеобразным анодом и катодом на состав и оптические свойства получаемых пленок может быть существенным. Эти характеристики пленок также могут зависеть и от того, при каком

потенциале друг относительно друга находятся подложкодержатель и полый анод [3].

Известно [3–6], что процессы, разыгрываемые в рабочей камере dc-магнетрона, достаточно сложны, чтобы заранее определенно предсказать тенденцию изменений состава и свойств этих пленок в зависимости от параметров электрического поля в рабочем объеме магнетрона. Насколько нам известно, в литературе к настоящему времени подобные исследования применительно к выращиванию пленок $a\text{-SiO}_x : \text{H}(\text{Er}, \text{O})$ dc-магнетронным методом отсутствуют. Поэтому цель настоящей работы состояла в исследовании влияния электрического поля в рабочей камере dc-магнетрона на состав и фотолюминесценцию ионов эрбия пленок $a\text{-SiO}_x : \text{H}(\text{Er}, \text{O})$.

2. Эксперимент

Пленки аморфного гидрогенизированного кремния, легированного эрбием и кислородом, были получены с использованием вертикального варианта конструкции магнетрона, в котором нижним электродом был катод, выше него располагались сначала полый анод, затем подложкодержатель. В качестве мишеней, являющихся катодом, применялись монокристаллический кремний и металлический эрбий. В рабочую камеру вводилась газовая смесь (20% $\text{SiH}_4 + 80\% \text{Ar}$) + O_2 . Полная площадь кремниевой мишени (марка КЭФ-5, пластина с ориентацией [111]) составляла ~ 2800 мм². Пластина металлического эрбия (Er-мишень) имела такие размеры, что всегда целиком находилась только в зоне эрозии Si-мишени. Контроль давления газовой смеси осуществлялся на выходе из рабочей камеры. Расстояние между полым кольцеобразным анодом и катодом составляло 9 мм, а расстояние между подложкодержателем

[¶] E-mail: undalov@mail.ioffe.ru

и катодом — 34 мм. Напряженность электрического поля и ток анод–катод имели следующие величины: $E_{ac} \approx 400$ В/см и $I_a = 27$ мА. Такие параметры процесса, как температура подложкодержателя (265°C), время напыления пленок (1 ч), расположение друг относительно друга подложки и пластинки металлического эрбия, положение входа газовой смеси в рабочую камеру, напряженность магнитного поля, ток полый анод–катод (27 мА) поддерживались неизменными.

Проводились две серии опытов. В I серии подложкодержатель был электрически изолирован от катода и полого кольцеобразного анода (как в [1,2]), т.е. ток (I_s) и напряженность электрического поля (E_{sc}) подложкодержатель–катод равнялись нулю. Изменялись лишь концентрация кислорода C_{O_2} (в диапазоне 0.15–12 мол.%) в газовой смеси (20% $\text{SiH}_4 + 80\% \text{Ar} + \text{O}_2$ на входе в рабочую камеру магнетрона, а также площади Er-мишени и зоны эрозии Si-мишени в пределах $S_{Er} = 0–18$ мм², $S_{Si} = 787–805$ мм² соответственно при постоянстве суммы площадей $S_{Er} + S_{Si} = 805$ мм².

При выращивании пленок II серии подложкодержатель и полый анод находились под положительным потенциалом относительно общего для них катода. В этом случае помимо электрического поля, создаваемого в пространстве между полым анодом и катодом (как и в случае I серии), существует электрическое поле подложкодержатель–катод (II серия), которое дополнительно ускоряет электроны в зоне полый анод–катод. Кроме того, поток электронов достигает не только полого анода, но и подложкодержателя в соответствии с задаваемыми значениями I_s и I_a . Вектора скорости движения отрицательных ионов (например, O_2^-) направлены электрическими полями как в сторону полого анода, так и в направлении подложкодержателя. Согласно [3], электрическое поле подложкодержатель–катод в дополнение к полю полый анод–катод в том виде, в каком оно используется в наших опытах, должно изменять распределение энергии электронов в электрическом поле в пространстве между полым анодом и катодом в зависимости от условий эксперимента (E_{ac} , E_{sc} при I_a , I_s , C_{O_2} , S_{Er} и S_{Si}). Все это должно привести к получению других параметров плазмы: средней энергии электронов, концентрации электронов и положительных ионов и т.д. [3]. Поэтому процесс ионизации входящих в реактор газообразных молекул может за счет упругих столкновений с электронами заметно измениться. В итоге условия распыления и окисления мишеней будут отличаться от прежних [1,2], что непременно должно сказаться на составе и свойствах получаемых пленок $a\text{-SiO}_x:\text{H}(\text{Er},\text{O})$.

Параметры опытов II серии следующие: напряженности электрического поля подложкодержатель–катод $E_{sc} \approx 0–100$ В/см, полый анод–катод $E_{ac} \approx 400$ В/см, токи $I_s = 0–27$ мА, $I_a \approx 27$ мА при постоянном значении $C_{O_2} = 8$ мол.% и изменяющейся величине $S_{Er} = 0–18$ мм². В работе [5] показано: скорость реакций

в газовой фазе благодаря плазме строго пропорциональна току разряда. Поэтому одними из характеристик процесса напыления пленок являются токи I_s и I_a .

Для того чтобы понять, как влияют вариации параметров процесса напыления пленок $a\text{-SiO}_x:\text{H}(\text{Er},\text{O})$ в опытах обеих серий на состав и фотолюминесцентные свойства образцов, сравнивались изменения концентраций элементарных компонент в них. Все это связывалось с величинами I_{PL}^{Er} образцов.

Элементный состав пленок, нанесенных на монокристаллические подложки из кремния (КДБ-10, ориентация [111]), изучался методом обратного резерфордского рассеяния дейтронов; при этом определялись концентрации кремния (N_{Si}) и эрбия (N_{Er}) в пленке. Общее содержание кислорода (N_{O}^{tot}) измерялось методом ядерных резонансных реакций с дейтронами (реакция $^{16}\text{O}(d,p)^{17}\text{O}$) [7]. Концентрации связанных с кремнием матрицы водорода ($N_{\text{H}}^{\text{Si-H}}$) и кислорода ($N_{\text{O}}^{\text{Si-O}}$) определялись методом инфракрасной спектроскопии. Концентрация связанного с эрбием кислорода ($N_{\text{O}}^{\text{Er-O}}$) для данного значения C_{O_2} и какой-либо $S_{Er} > 0$ оценивалась исходя из следующего соотношения:

$$N_{\text{O}}^{tot} = N_{\text{O}}^{\text{Si-O}} + N_{\text{O}}^{\text{Er-O}} + N_{\text{O}}^{\text{X-O}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{O}}^{\text{X-O}}$ — концентрация кислорода, связанного с неконтролируемыми примесями. Когда $S_{Er} = 0$, выражение (1) будет выглядеть так:

$$N_{\text{O}}^{tot} = N_{\text{O}}^{\text{Si-O}} + N_{\text{O}}^{\text{X-O}}. \quad (2)$$

Если допустить, что величина $N_{\text{O}}^{\text{X-O}}$ одинакова для всех $S_{Er} \geq 0$, то после несложных преобразований системы выражений (1) и (2) для конкретного значения $S_{Er} > 0$ можно записать

$$N_{\text{O}}^{\text{Er-O}} = [(N_{\text{O}}^{tot})_{S_{Er}>0} - (N_{\text{O}}^{tot})_{S_{Er}=0}] - [(N_{\text{O}}^{\text{Si-O}})_{S_{Er}>0} - (N_{\text{O}}^{\text{Si-O}})_{S_{Er}=0}], \quad (3)$$

где индексы $S_{Er} > 0$ и $S_{Er} = 0$ показывают, что концентрации кислорода соответствуют данному значению S_{Er} для ряда опытов, проведенных при одной и той же величине C_{O_2} .

Интенсивность эрбиевой фотолюминесценции на длине волны $\lambda = 1.54$ мкм измерялась при возбуждении излучением аргонового лазера ($\lambda = 514.5$ нм) с использованием решеточного спектрометра и охлаждаемого германиевого фотоприемника для пленок $a\text{-SiO}_x:\text{H}(\text{Er},\text{O})$, нанесенных на подложки из ситалла. Все измерения интенсивности фотолюминесценции эрбия проводились относительно одного реперного образца. Этот же образец сравнения использовался и в [2].

3. Результаты эксперимента и обсуждение

В I серии опытов концентрации силана, аргона, кислорода в газовой смеси на входе в реактор варьировались в следующих пределах: $C_{\text{SiH}_4} \approx 20–17.5$ мол.%,

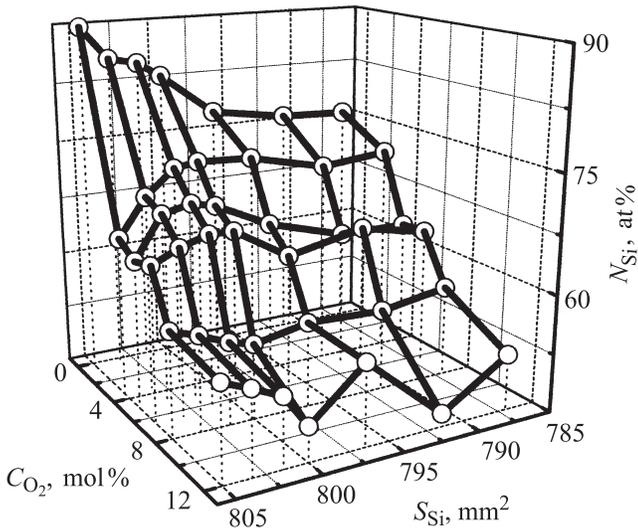


Рис. 1. Зависимость концентрации кремния N_{Si} в пленках I серии опытов ($I_s = 0$) от C_{O_2} и S_{Si} .

$C_{Ar} = 80-70$ мол%, $C_{O_2} = 0.15-12$ мол%. Приведенные величины C_{SiH_4} и C_{Ar} рассчитаны с учетом того, что измеренное общее давление газовой смеси составляло $\sim 7.5 \cdot 10^{-3}$ торр, измеренное давление кислорода измерялось от $\sim 1.1 \cdot 10^{-5}$ торр ($C_{O_2} = 0.15$ мол%) до $\sim 9 \cdot 10^{-4}$ торр ($C_{O_2} = 12$ мол%), а также $C_{Ar}/C_{SiH_4} = 4$. Отношение C_{Ar}/C_{O_2} , которое оказывает влияние на процессы распыления–окисления, падало примерно от ~ 530 до ~ 6 с ростом C_{O_2} от 0.15 до 12 мол% при одновременном уменьшении C_{Ar} . Эти эксперименты (как и в [2]) выявили, что с ростом C_{O_2} в пленках происходит уменьшение концентрации кремния (рис. 1) и эрбия (рис. 3 работы [2]). Кроме того, происходит увеличение концентрации кислорода (см. рис. 1, а и 2 работы [2]), как общего, N_{O}^{tot} , так и связанного с кремнием, N_{O}^{Si-O} , и с эрбием, N_{O}^{Er-O} . Для каждого фиксированного значения $C_{O_2} > 0.15$ мол% зависимость $N_{Si} = f(S_{Si})$ (рис. 1) не имеет явно выраженной тенденции к уменьшению или увеличению из-за относительно малого диапазона изменения площади эрозии кремниевой мишени ($S_{Si} = 787-805$ мм²): максимальное уменьшение величины S_{Si} составляло $\Delta S_{Si} = 18$ мм², т.е. всего 2% от максимальной площади $S_{Si}^{max} = 805$ мм² при неизменной сумме площадей Si- и Er-мишеней.

В то же время зависимость $N_{Er} = f(S_{Er})$ (рис. 3 работы [2]) для всех фиксированных значений $C_{O_2} > 5$ мол% и ~ 3.5 мол% с увеличением S_{Er} возрастает монотонно до $N_{Er} \approx 0.1-0.2$ ат% при максимальной площади мишени $S_{Er}^{max} = 18$ мм². При $C_{O_2} = 0.15$ мол% зависимость $N_{Si} = f(S_{Si})$ (рис. 1) оказывается возрастающей, что принципиально отличается ее от аналогичных кривых, но соответствующих $C_{O_2} > 0.15$ мол%. Кривая $N_{Er} = f(S_{Er})$ (рис. 3 работы [2]) для $C_{O_2} = 0.15$ мол% также отличается от других, построенных для $C_{O_2} > 0.15$ мол%: она отражает более резкий подъем. В случае дефицита кислорода ($C_{O_2} = 0.15$ мол%) из-за относительно

незначительного окисления Si- и Er-мишеней влияние изменения величин S_{Si} и S_{Er} на значения N_{Si} и N_{Er} соответственно сказывается наиболее заметно. В этом случае N_{Si} и N_{Er} увеличиваются с ростом площади соответствующих мишеней, достигая своих максимальных значений: $N_{Si}^{max} \approx 90$ ат% (для $S_{Si}^{max} = 805$ мм²) (рис. 1) и $N_{Er}^{max} \approx 0.55$ ат% (при $S_{Er}^{max} = 18$ мм²) (рис. 3 работы [2]). При этом значениям N_{Si}^{max} и N_{Er}^{max} отвечают очень небольшие величины N_{O}^{Si-O} и N_{O}^{Er-O} (см. в [2] рис. 1, а и рис. 2). Толщина пленок при неизменном времени напыления изменялась в пределах $d = 0.55-0.78$ мкм.

Таким образом, анализ состава пленок I серии подтвердил, что решающую роль в изменении N_{Si} и N_{Er} , скорее всего, играет баланс процессов распыления и окисления обеих мишеней, так как образование нелетучих субокислов кремния и эрбия на поверхностях соответствующих мишеней уменьшает их коэффициент распыления [1–4]. На концентрации же кислорода в пленках N_{O}^{Si-O} и N_{O}^{Er-O} количество введенного в газовую фазу кислорода C_{O_2} оказывает прямое воздействие.

Опыты II серии показали, что $N_{Si} = f(I_s)$ (рис. 2) и $N_{Er} = f(I_s)$ (рис. 3) — это возрастающие, а $N_{O}^{Si-O} = f(I_s)$ (рис. 4) и $N_{O}^{Er-O} = f(I_s)$ (рис. 5) — убывающие зависимости. Эти результаты, как видно, противоположны по своему характеру в сравнении с результатами опытов I серии, если аналогичные параметры в случае I серии рассматривать в зависимости от C_{O_2} . Возможная причина наблюдаемого во II серии опытов — радикальные изменения в процессах, протекающих в плазме и на электродах магнетрона, по сравнению с I серий.

На наш взгляд, если принять упрощенный вариант процессов, протекающих в плазме и на электродах магнетрона, в системе, вероятно, происходит следующее: в зоне полый анод–катод к электронам, достигающим полого анода, добавляются электроны, которые в итоге

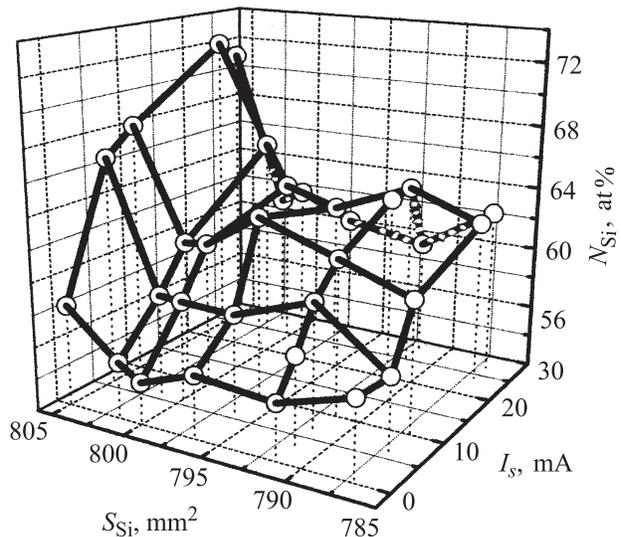


Рис. 2. Зависимость $N_{Si} = f(I_s, S_{Si})$ для пленок II серии опытов ($C_{O_2} = 8$ мол%).

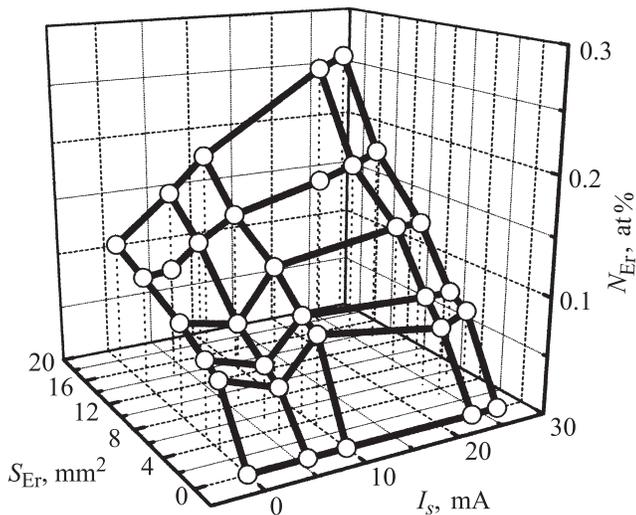


Рис. 3. Вариации концентрации эрбия N_{Er} в пленках II серии опытов ($C_{O_2} = 8$ мол%) при изменении I_s и S_{Er} .

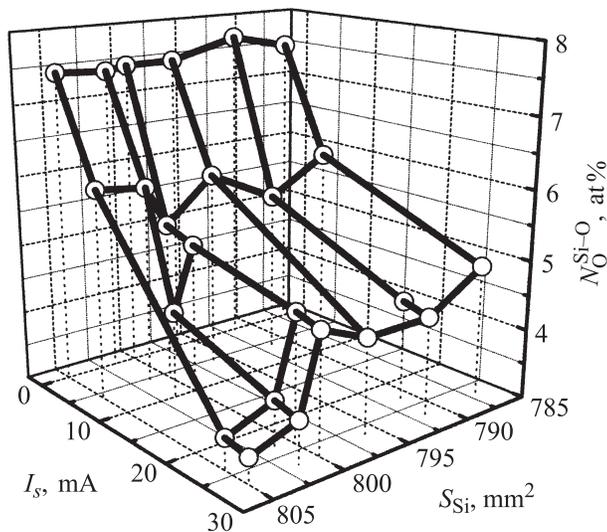


Рис. 4. Влияние I_s и S_{Si} на концентрацию связанного с кремнием кислорода N_{O}^{Si-O} в пленках II серии опытов ($C_{O_2} = 8$ мол%).

долетают до подложкодержателя. Так как ток I_a поддерживается неизменным, концентрация электронов в пространстве полый анод–катод, стремящихся достичь полого анода (N_e^{ac}), также будет неизменной во всех опытах обеих серий. В соответствии с задаваемой величиной тока I_s значение N_e^{ac} возрастает на величину, соответствующую концентрации электронов, направляющихся в сторону подложкодержателя (и впоследствии достигающих его) (N_c^{sc}) и находящихся в данный момент времени в зоне полый анод–катод рабочей камеры. Таким образом, рост концентрации электронов в этой зоне приводит к увеличению вероятности упругих столкновений электронов с газообразными молекулами SiH_4 , Ar и O_2 . В результате в зоне анод–катод возрастает количество образующихся за счет этого ионов SiH_3^+ , H_2^+ , Ar^+

и O_2^+ . Поток этих положительных ионов в сторону катода (Si - и Er -мишени) усилится по сравнению с I серией.

Известно, что при бомбардировке ионами Ar^+ кремния и различных металлов (в том числе и окисленных до субокислов) мишени испускают в основном нейтральные частицы [4]. Если же рассматривать газовую фазу, то наряду с SiH_3^+ , являющимися среди ионов, согласно [5], преобладающим компонентом (кроме Ar^+), в результате упругих столкновений быстрых электронов с молекулами водорода и кислорода в плазме образуются ионы H_2^+ и O_2^+ [3,4]. Присутствие в системе кислорода, как известно [6], ускоряет процесс диссоциации силана. Ионы SiH_3^+ также могут взаимодействовать с кислородом. Продуктом этих реакций являются субокисные кремниевые ассоциаты. Подтверждением этому служит существование постепенно нарастающего на поверхности Si -мишени вне зоны эрозии слоя макроскопических частиц кремния.

Диапазоны изменения входящих в рабочую камеру количеств компонент газовой смеси во II серии соответствуют следующему: $C_{SiH_4} \approx 18.5$ мол%, $C_{Ar} \approx 73.5$ мол%, $C_{O_2} = 8$ мол%. Значения C_{SiH_4} и C_{Ar} получены расчетным путем при отношении давления аргона к давлению силана 4 исходя из того, что измеренное общее давление газовой смеси составляет $\sim 7.5 \cdot 10^{-3}$ торр, а измеренное давление кислорода $\sim 6 \cdot 10^{-4}$ торр. Видно, что во II серии опытов C_{Ar} больше C_{O_2} примерно на порядок величины. Следовательно, усиление электрического поля в пространстве полый анод–катод, когда $I_s > 0$, приводит в итоге, как говорилось выше, к увеличению потоков положительно заряженных ионов Ar^+ , O_2^+ , SiH_3^+ и H_2^+ по направлению к катоду. Особое влияние на состав и свойства получаемых пленок, на наш взгляд, оказывают изменения потоков ионов Ar^+ и O_2^+ .

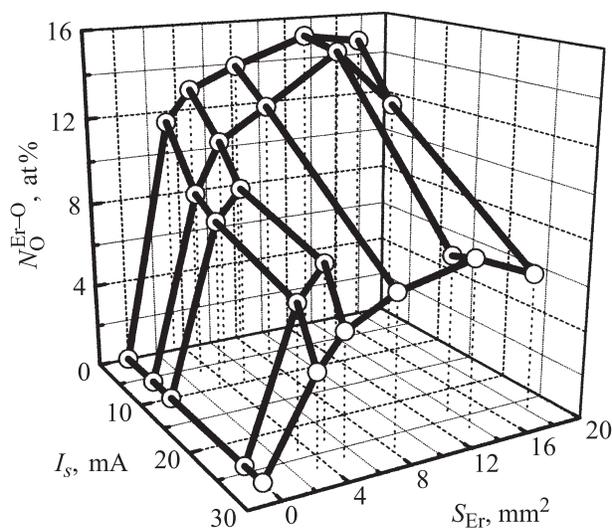


Рис. 5. Изменение концентрации связанного с эрбием кислорода N_{O}^{Er-O} в зависимости от параметров I_s и S_{Er} в пленках II серии опытов ($C_{O_2} = 8$ мол%). N_{O}^{Er-O} определялась по формуле (3).

Увеличение концентрации и кинетической энергии ионов аргона приводит к усилению распыления мишеней. Кроме того, более энергичные ионы аргона, участвуя в каскадных столкновениях в приповерхностных участках мишеней, привлекают к этому процессу более глубокие слои материала мишеней. Эти слои могут быть обеднены кислородом.

С другой стороны, усиление потока ионов кислорода O_2^+ к катоду должно несколько ускорить процесс окисления поверхности мишеней как в зоне эрозии, так и вне ее. В свою очередь это ускорение окисления приводит к ослаблению распыления мишеней [1–4].

Во II серии опытов концентрация аргона, $C_{\text{Ar}} \approx 73.5$ мол%, значительно больше концентрации кислорода, $C_{\text{O}_2} = 8$ мол%. Вероятно, следует учесть и то, что в газовой фазе происходит некоторое усиление процесса взаимодействия ионов O_2^+ с силаном и с SiH_3^+ . Получаемые продукты, содержащие кислород, возможно, осаждаются на поверхности Si-мишени вне зоны эрозии и не попадают на растущую поверхность пленки $a\text{-SiO}_x\text{:H}\langle\text{Er},\text{O}\rangle$. В результате с ростом I_s происходит слабое ускорение процесса окисления мишеней в зоне эрозии по сравнению с усилением их распыления.

На фоне влияния потока ионов аргона на процесс распыления мишеней вклад усиления потока ионов H_2^+ как наиболее легких частиц должен быть незначительным. Согласно нашим исследованиям, усиление электрического поля, т.е. рост величины I_s , не приводит к заметному возрастанию концентрации водорода ($N_{\text{H}}^{\text{Si-H}}$) в пленках: для $I_s = 0$ имеем $N_{\text{H}}^{\text{Si-H}} \approx 7\text{--}9$ ат%, для $I_s > 0$ получено $N_{\text{H}}^{\text{Si-H}} \approx 8\text{--}10$ ат%, что находится в пределах ошибки метода определения этой концентрации.

В результате неупругих столкновений электронов с молекулами газообразного кислорода в плазме образуются отрицательные ионы O_2^- [3]. При рассмотрении возможного влияния отрицательных ионов O_2^- на окисление пленок $a\text{-SiO}_x\text{:H}\langle\text{Er},\text{O}\rangle$ следует заметить следующее: во-первых, считается [3,4], что концентрация ионов O_2^- в плазме намного меньше, чем O_2^+ ; во-вторых, взаимодействие ионов O_2^- с растущей поверхностью пленок, скорее всего, имеет место и должно несколько увеличивать общую концентрацию кислорода ($N_{\text{O}}^{\text{tot}}$) в образцах. Однако, учитывая, что $N_{\text{O}}^{\text{tot}}$ в пленках II серии заметно уменьшается с ростом I_s , можно сделать заключение о существенно меньшем вкладе ионов O_2^- в величину $N_{\text{O}}^{\text{tot}}$ по сравнению с ионами O_2^+ . В итоге можно заключить, что баланс процессов распыление–окисление мишеней при появлении электрического поля подложкодержатель–катод, усиливающего поле в пространстве полый анод–катод, смещается в сторону усиления распыления [3,4] и является основным в формировании состава и свойств пленок $a\text{-SiO}_x\text{:H}\langle\text{Er},\text{O}\rangle$.

Для всех фиксированных значений I_s зависимость $N_{\text{Er}} = f(S_{\text{Er}})$ (рис. 3) — монотонно возрастающая (как и в случае I серии, — рис. 3 работы [2]). Кривые $N_{\text{Si}} = f(S_{\text{Si}})$ (рис. 2) для каждого фиксированного значения I_s в диапазоне $S_{\text{Si}} = 787\text{--}801.5$ мм² практически не проявляют тенденции к явному увеличению или умень-

шению, а в отсутствие эрбия, когда $S_{\text{Si}} = 805$ мм², предполагаются заметно выше остальных. Аналогичное поведение зависимости $N_{\text{Si}} = f(S_{\text{Si}})$ наблюдается и в I серии (рис. 1).

Вид зависимостей для толщины пленок $d = f(I_s, S_{\text{Si}})$ и концентрации кремния $N_{\text{Si}} = f(I_s, S_{\text{Si}})$ на рис. 2 практически одинаков. Толщина пленок при времени напыления 1 ч для $C_{\text{O}_2} = 8$ мол% соответствовала 0.68–0.73 мкм ($I_s = 0$) и 0.68–1.2 мкм ($I_s > 0$): она увеличивалась с ростом I_s . Очевидного влияния изменения S_{Si} при $I_s = \text{const}$ на величину d не замечено.

Характер кривых $N_{\text{O}}^{\text{Si-O}} = f(S_{\text{Si}})$ на рис. 4 практически мало изменяется для всех фиксированных значений I_s . В то же время зависимость $N_{\text{O}}^{\text{Er-O}} = f(S_{\text{Er}})$ является монотонно возрастающей (рис. 5).

В случае опытов I серии зависимости $I_{\text{PL}}^{\text{Er}} = f(C_{\text{O}_2})$ и $I_{\text{PL}}^{\text{Er}} = f(S_{\text{Er}})$ (рис. 6) имеют возрастающий характер: первая зависимость — во всем интервале изменения C_{O_2} и для всех значений S_{Er} , а вторая — при $S_{\text{Er}} = 13.5$ мм² для $C_{\text{O}_2} = 8\text{--}12$ мол% имеет максимум, после которого убывает. Максимальное значение $I_{\text{PL}}^{\text{Er}}$ достигается при $C_{\text{O}_2} = 12$ мол% и $S_{\text{Er}} \approx 13.5$ мм².

Наибольшие величины $I_{\text{PL}}^{\text{Er}}$ соответствуют сочетанию малых величин N_{Er} ($N_{\text{Er}} \leq 0.1$ ат%) и больших значений $N_{\text{O}}^{\text{Er-O}}$ и, как следствие, — большим отношениям $N_{\text{O}}^{\text{Er-O}}/N_{\text{Er}}$ и $N_{\text{O}}^{\text{tot}}/N_{\text{Er}}$, превосходящим примерно в 30–40 раз отношение $N_{\text{O}}^{\text{tot}}/N_{\text{Er}} = 10$ [8]. Учитывая прямую зависимость $N_{\text{O}}^{\text{tot}}$, $N_{\text{O}}^{\text{Si-O}}$ и $N_{\text{O}}^{\text{Er-O}}$ от C_{O_2} , неудивительно, что таким наибольшим величинам $I_{\text{PL}}^{\text{Er}}$ отвечают также большие значения $N_{\text{O}}^{\text{Si-O}}/N_{\text{Si}}$. Это подтверждает существование тесной зависимости всех приведенных характеристик состава пленок от условий их получения, т.е. параметры $N_{\text{O}}^{\text{tot}}$, $N_{\text{O}}^{\text{Si-O}}$ и $N_{\text{O}}^{\text{Er-O}}$ не являются независимо полученными.

Пленки II серии экспериментов характеризуются резким падением кривых $I_{\text{PL}}^{\text{Er}} = f(I_s)$ (см. рис. 7)

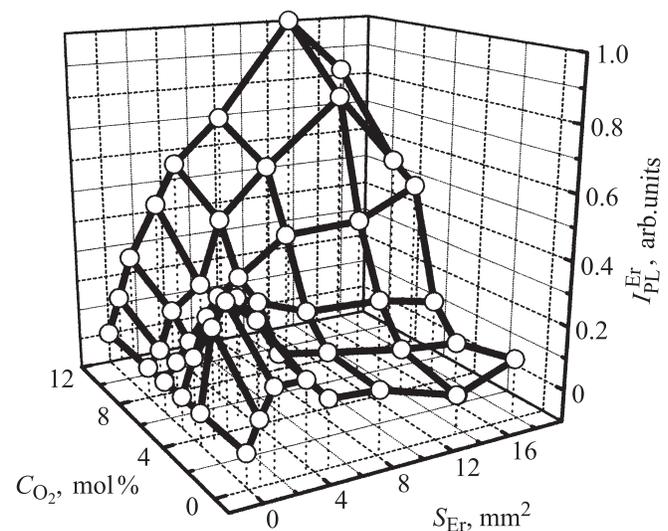


Рис. 6. Зависимость интенсивности фотолюминесценции ионов эрбия Er^{3+} , $I_{\text{PL}}^{\text{Er}}$, пленок I серии опытов ($I_s = 0$) от C_{O_2} и S_{Er} .

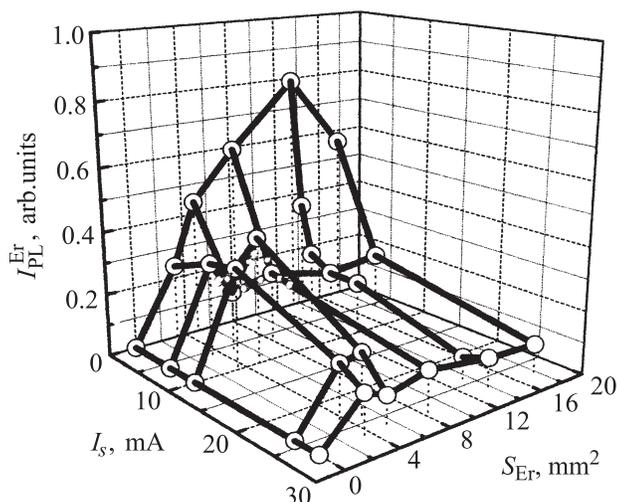


Рис. 7. Влияние значений I_s и S_{Er} на I_{PL}^{Er} для пленок II серии опытов ($C_{O_2} = 8$ мол%).

сразу же после появления электрического поля подложкодержатель–катод в системе и последующим, когда $I_s \geq 6$ мА, слабым убыванием практически для каждого фиксированного значения S_{Er} во всем диапазоне его изменения. При сочетании сравнительно небольших значений $I_s = 6–10$ мА и $S_{Er} = 3.5–5$ мм² наблюдается небольшой „всплеск“ I_{PL}^{Er} , который, однако, существенно меньше I_{PL}^{Er} , когда $I_s = 0$ и $S_{Er} = 13.5$ мм² (рис. 7).

В случае зависимости $I_{PL}^{Er} = f(I_s, S_{Er})$ максимальные значения I_{PL}^{Er} достигаются тогда, когда $I_s = 0$. Вот почему и наибольшие величины I_{PL}^{Er} соответствуют аналогичным сочетаниям N_{Er} и N_{O}^{Er-O} (или N_{O}^{Si-O}/N_{Si} и N_{O}^{Er-O}/N_{Er}) как в I, так и во II сериях, когда $I_s = 0$.

4. Заключение

Таким образом, в условиях изменения концентрации входящих в рабочую камеру dc-магнетрона компонентов газовой смеси, площади Er-мишени и электрического поля в достаточно широких пределах ($C_{SiH_4} \approx 20–17.5$ мол%, $C_{Ar} \approx 80–70$ мол%, $C_{O_2} = 0.15–12$ мол%, $S_{Er} = 0–18$ мм², $I_s = 0–27$ мА, $I_a = 27$ мА, $E_{sc} \approx 0–100$ В/см и $E_{ac} \approx 400$ В/см), изучен процесс получения пленок $a-SiO_x:H(Er,O)$ методом магнетронного распыления на постоянном токе.

Показано, что распыление и окисление поверхности Si- и Er-мишеней в конечном счете являются основными процессами в формировании состава пленок. Баланс этих процессов смещается в ту или другую сторону в зависимости от значений приведенных выше параметров, т. е. от C_{O_2} , S_{Er} и I_s и др.

Эти исследования позволили выявить оптимальные условия получения пленок $a-SiO_x:H(Er,O)$ dc-магнетронным методом, когда значения I_{PL}^{Er} оказываются наибольшими. При этом подложкодержатель должен быть электрически изолирован от электродов источника напряжения, т. е. $I_s = 0$ и $E_{sc} = 0$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-02-16028 и программой фундаментальных исследований РАН „Новые материалы и структуры“.

Список литературы

- [1] Ю.К. Ундалов, Е.И. Теруков, О.Б. Гусев, В.Х. Кудоярова. ФТП, **37**, 853 (2003).
- [2] Ю.К. Ундалов, Е.И. Теруков, О.Б. Гусев, В.Х. Кудоярова. ФТП, **39**, 979 (2005).
- [3] Л. Леб. *Основные процессы электрических разрядов в газах* (М.-Л., Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1950).
- [4] *Распыление под действием бомбардировки частицами*: вып. 3, под ред. Р. Бериша, К. Витмака (М., Мир, 1998). [Пер. с англ.: *Sputtering by particle bombardment*, pt. 3, ed. by R. Behrisch, K. Wittmaack (Springer-Verlag, Berlin, 1991)].
- [5] G. Drevillon, J. Huc, A. Lloret, J. Perrin, G. de Rosny, J.P.M. Schmitt. Appl. Phys. Lett., **37**, 646 (1980).
- [6] F.J. Kammupas. In: *Semiconductors and Semimetals*, ed. by J.J. Pankov (N.Y., 1984) v. 21A, p. 153.
- [7] G.E. Gavrilo, A.G. Krivchitch, V.M. Lebedev. Nucl. Instr. Meth., **A515**, 108 (2003).
- [8] В.Х. Кудоярова, А.Н. Кузнецов, Е.И. Теруков, О.Б. Гусев, Ю.А. Кудрявцев, Б.Я. Бер, Г.М. Гусинский, W. Fuhs, G. Weiser, H. Kuehne. ФТП, **32**, 1384 (1998).

Редактор Л.В. Шаронова

Influence of electric field at obtaining of $a-SiO_x:H(Er,O)$ films by dc-magnetron sputtering method on their composition and photoluminescence intensity of erbium ions

Yu.K. Undalov, E.I. Terukov, O.B. Gusev, V.M. Lebedev⁺, I.N. Trapeznikova

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia
+ B.P. Konstantinov Petersburg
Nuclear Physics Institute,
Russian Academy of Sciences,
188300 Gatchina, Russia

Abstract Effect of electric field on element composition and photoluminescence of amorphous hydrogenised silicon films doped with erbium and oxygen ($a-SiO_x:H(Er,O)$), at preparation by dc-magnetron method was investigated. Two series of films prepared were studied depending on the ratio between the area of the metal erbium target and oxygen concentration at the input of the process chamber, and also on the electric field strength of the magnetron. The first series of films was obtained with electrically insulated substrate holder, in the second series it was under a positive potential with respect to cathode. It was shown that although the character of changes in the element composition of the films and the intensity of erbium ions Er^{+3} photoluminescence were considerably different in these two series, in both cases it was finally governed by the atomization–oxidation processes of the Si- and Er-targets used as cathodes.