

и низкая влагостойкость пленок, осажденных при низких температурах, может быть обусловлена микрошероховатостью и рыхлостью поверхности, что увеличивает контактирующую с атмосферой поверхность пленок. Термический отжиг уменьшает количество разорванных связей путем упорядочения системы, что увеличивает влагостойкость, а происходящий при термоотжиге процесс оплавления примесносиликатного стекла дополнительно стабилизирует его параметры путем минимизации площади поверхности.

Таким образом, осажденные при средних температурах пленки БСС, ФСС и БФСС с последующим отжигом при $T=850^{\circ}\text{C}$ удовлетворяют требованиям современной технологии по влагостойкости. Однако в случае осаждения указанных пленок на алюминиевую металлизацию термоотжиг при $T=850^{\circ}\text{C}$ недопустим. Альтернативой может быть применение "плазменных" пленок диоксида и оксинитрида кремния с присадкой фосфора [12], отличающихся повышенной влагостойкостью.

Процесс выщелачивания легирующих примесей возможен также при химических обработках свежесажденных стекол, сформированных при температурах ниже 480°C , что значительно ухудшает их способность к оплавлению.

Работа выполнена при финансовой поддержке НПО "Интеграл". Запись ИК-спектров произведена Г.М.Сороко. Помощь в обработке данных ИК-спектроскопии оказал С.Н. Шашков.

1. Лабуда А.А., Сидерко А.А. //Вакуумная техника и технология. 1994. №2. Т.4. С.52.
2. Они же //Вестн. Белорус. ун-та. Сер.1. 1993. №1. С.25.
3. Быстров Ю.А., Колчин Е.А., Котлецов Б.Н. Технологический контроль размеров в микроэлектронном производстве. М.,1988. С.168.
4. Hudhes M.C., Wondsidler D.B. //J. Electrochem. Soc. 1987. V.134. №6. P.1488.
5. Вилков Л.В., Пентин Ю.А. Физические методы исследования в химии. М.,1989. С. 288.
6. Pliskin W.A. //J. Vac. Sci. Technol. 1977. V.14. №5. P.1064.
7. Tenney A.S., Chezzo M. //J. Electrochem. Soc. 1973. V.120. №9. P.1279.
8. Гончакова Н.Н., Левнева В.А., Тулин В.А. // Электронная техника. Сер.6. Материалы. 1986. Вып.5. С.46.
9. Моро У. Микролитография: В 2 ч. М.,1991. С.1240.
10. Турцевич А.С., Зайцев Д.А., Кабанов М.М. //Электронная техника. Сер.3. Микроэлектроника. 1992. Вып.1,146. С.24.
11. Грибов Л.А., Деменьтьев В.А. Методы и алгоритмы вычислений в теории колебательных спектров молекул. М.,1981. С.355.
12. Плазменная технология в производстве СБИС /Под ред. Н.Айспрука, Д.Брауна. М.,1987. С.470.

Поступила в редакцию 11.11.96.

УДК 535.337

С.В. БАРАРЬ, А.П. ЗАЖОГИН, М.Н. КОВАЛЕНКО

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИОНОВ Cr^{3+} ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И КОНЦЕНТРАЦИЯХ ЕГО В САПФИРЕ

The temperature effect on spectral characteristics of luminescence of chromium ions with varying concentrations in sapphire has been investigated. It has been determined that the change in spectral characteristics (halfwidths and shift of R -lines) in the crystals depending on temperature is adequately governed by the power law. The possibility for using ruby crystals with the concentration of chromium ions of the order of 0,7–0,75% as contactless temperature detectors for samples has been demonstrated.

Большой интерес для таких разделов физики, как материаловедение, физика твердого тела, представляют рентгеноструктурные исследования материалов при очень высоких давлениях и температурах. Прогресс в методах получения и измерения высокого давления и температуры позволил произвести обширные исследования структуры твердых веществ, причем измерение давлений и температур в этих экспериментах производилось по

спектрам люминесценции рубина. В то же время в литературе имеются противоречия в оценке возможности использования рубина для измерения тех или иных значений давления и температуры. По-видимому, это обусловлено тем, что в различных установках использованы рубины с различной концентрацией ионов хрома [1–3].

Поэтому в настоящей работе была поставлена задача исследовать влияние температуры на спектральные характеристики люминесценции ионов Cr^{3+} при различных его концентрациях в сапфире, определить область концентрации, наиболее оптимальную для использования в упомянутых экспериментах.

В ходе работы изучались спектры люминесценции трех образцов рубина, концентрация хрома в которых была определена с помощью атомно-эмиссионного спектрального анализа.

При исследованиях в области температур от комнатной и выше каждый образец устанавливался в камере с регулируемой температурой, а при низких температурах помещался в сосуд Дюара. Люминесценция кристаллов рубина регистрировалась полихроматором MDD 500×2, на выходе которого установлен оптический многоканальный анализатор (ОМА). Обратная линейная дисперсия прибора 0,84 нм/мм.

Спектры люминесценции образцов рубина изучались при изменениях температуры от 77 до ~523 К.

При комнатной температуре спектр люминесценции образца №1 (0,75% Cr^{3+}) состоит из двух хорошо разрешенных R_1 и R_2 -линий, расположенных в области 6943,0 Å и 6928,2 Å соответственно (рис.1,б). При увеличении температуры до 323 К происходит сдвиг R -линий в более длинноволновую область спектра. Уже при $T=423$ К, как видно на рис.1,в, R_1 и R_2 -линии практически сливаются в одну, а их интенсивность падает при тех же условиях снятия спектра.

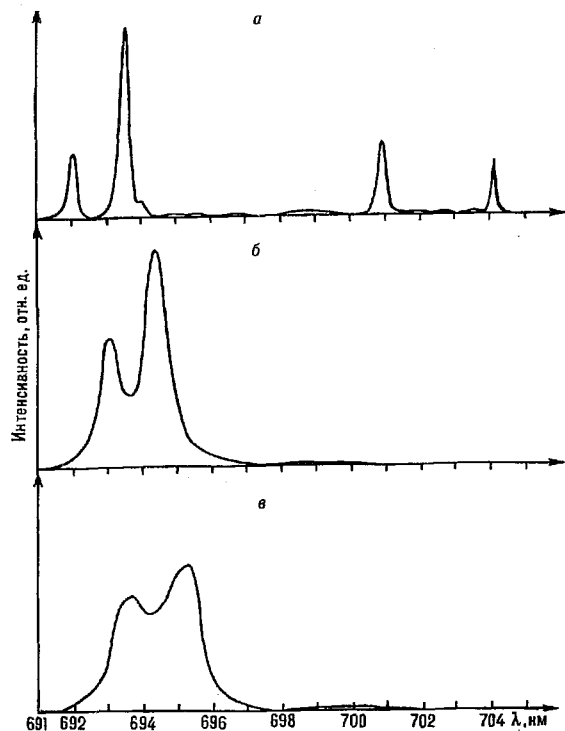


Рис.1. Спектры люминесценции кристалла рубина с содержанием хрома 0,75% при различной температуре (T , К):

а – 77; б – 290; в – 423

При температуре жидкого азота максимумы R_1 и R_2 -линий находятся в области 6934,8 и 6921,1 Å соответственно. На длинноволновом крыле линии R_1 наблюдается небольшой пик в области 6938,5 Å (рис.1,а). При этой же температуре на длинах волн 7008,6 и 7040,3 Å наблюдаются N -линии. При $T=198$ К (температура сухого льда) эти линии в спектре еще проявляются, хотя интенсивность их существенно уменьшается. По положению они смещаются в длинноволновую сторону спектра на 0,1 нм. При комнатной температуре N -линии не наблюдаются. Поэтому в практических целях для нас имеет большее значение исследование температурной зависимости люминесценции R -линий.

Зависимости длины волны, полуширины и интенсивности R_1 -линии от температуры представлены в табл.1. Следует отметить, что значения интенсивности линии, полученные при нагревании образца от комнатной температуры и выше, можно считать сопоставимыми друг с другом, так как измерения спектров проводились на одной и той же установке. Исследования кристаллов при низких температурах происходили на другой установке, при другой ширине щели полихроматора, поэтому эти величины сопоставлять с данными при высоких температурах нельзя. В скобках указаны интенсивности линий при увеличенном числе считываний в 5 раз.

Таблица 1

Положение $\lambda(R_1)$, интенсивность I (отн. ед.) и полуширина $\Delta\nu(R_1)$ линии R_1
для образцов рубина

Образец	Параметр	Температура, К					
		77	198	290	323	373	423
1	$\lambda(R_1), \text{Å}$	6934,8	6935,2	6943,5	6948,5	6949,7	6953,3
	Интенсивность R_1	2354	6171	2968	2535	2006	(1931)
	$\Delta\nu(R_1), \text{см}^{-1}$	3,3	7,41	19,7	21,0	29,7	32,1
2	$\lambda(R_1), \text{Å}$	6934,2	6936,9	6943,3	6945,5	6947,6	6952,1
	Интенсивность R_1	2217	1688	3227	2107	1514	1476
	$\Delta\nu(R_1), \text{см}^{-1}$	4,4	11,1	14,9	17,1	25,0	29,9
3	$\lambda(R_1), \text{Å}$	6934,1	6937,3	6943,0	6946,2	6949,4	6955,6
	Интенсивность R_1	5526	1460	3415	2159	1275	446
	$\Delta\nu(R_1), \text{см}^{-1}$	2,7	4,1	15,6	23,0	25,1	55,0

Концентрация ионов Cr в образце №2 составляет 0,71%, однако, по сравнению со спектром предыдущего образца, спектр люминесценции его в области R -линий имеет уже более широкие полосы, хотя и несколько большей интенсивности: $\lambda(R_1)=6942,3$ Å, $\lambda(R_2)=6928,8$ Å. Разрешенность этих линий уменьшается уже при $T=323$ К, сдвиг R_1 -линии в длинноволновую область спектра составляет примерно 3,2 Å. При $T=373$ К R_1 и R_2 -линии практически сливаются в одну общую линию (R_1+R_2). Следует отметить, что R -линии этого образца при температуре сухого льда так же, как и при комнатной, шире линий в спектре описанного ранее кристалла. При $T=77$ К очень хорошо наблюдаются N -линии, интенсивность которых превышает интенсивность R -линий. Зависимости интенсивности, полуширины и сдвига R_1 -линии от T также приведены в табл.1.

Образцом №3 является типичный генерационный рубин с содержанием хрома в корунде 0,05%. При комнатной температуре максимумы R_1 и R_2 -линий находятся на длинах волн 6943,0 и 6929,6 Å соответственно. При увеличении температуры до 323 К максимумы этих линий смещаются в длинноволновую область и равны соответственно 6946,2 и 6932,9 Å. При $T=423$ К интенсивность линий резко (приблизительно в три раза) падает, по сравнению с интенсивностью их при предыдущей температуре, поэтому дальнейшее нагревание кристалла не производилось. Значения интенсивности, длины волн и полуширины R -линий при различных температурах представлены в табл.1.

При низких температурах в спектрах люминесценции данного образца не наблюдается N -линий. При $T=77\text{ К}$ $\lambda(R_1)=6934,8\text{ \AA}$ и $\lambda(R_2)=6921,1\text{ \AA}$ линии обладают хорошей интенсивностью и имеют малую ширину.

Как видно из приведенных результатов, при увеличении концентрации ионов Cr^{3+} в рубине спектр люминесценции изменяется. При малых концентрациях ($\sim 0,05\%$) абсолютный квантовый выход люминесценции рубина равен 0,47, причем на долю R -дублета приходится около 60% всего выхода люминесценции [4]. При увеличении концентрации хрома квантовый выход люминесценции в R -линиях падает, возникают N -линии и ряд других узких полос в красной области спектра. Исследование концентрационной зависимости этих и других дополнительных линий, указанных в [5,6], показывает, что их интенсивность нелинейно зависит от концентрации, что свидетельствует о принадлежности этих линий к спектру пар (или более сложных комплексов) обменно связанных друг с другом ионов хрома. Представляется вероятным, что многочисленные одиночные ионы хрома поглощают энергию возбуждающего излучения и передают ее гораздо более редким парам ионов хрома, которые испускают N -линии.

Появление двух R -линий, соответствующих одному переходу ${}^2E \rightarrow {}^4A_2$ объясняется расщеплением уровня 2E на два подуровня, отстоящих на 29 см^{-1} друг от друга. При более низких температурах они сдвигаются в более коротковолновую область спектра и сильно сужаются. Вероятно, основным фактором, определяющим ширину линии при низкой температуре, являются неоднородные внутренние напряжения в кристалле [7]. Чем меньше напряжения, тем уже линия. Из работ [7,8] известно, что у типичного розового рубина ширина линии составляет $0,3\text{ см}^{-1}$ при 77 К . Образец №3 был вырезан из такого же генерационного рубина, однако из экспериментальных данных следует, что ширина линии при $T=77\text{ К}$ составляет $2,7\text{ см}^{-1}$. Такое расхождение можно объяснить более низкой разрешающей способностью нашего прибора по сравнению с установками, указанными в [9].

Из табл.1 видно, что наиболее быстрое увеличение полуширины линии происходит в образце №3 ($0,05\% \text{ Cr}^{3+}$), причем, как было замечено, при $T > 373\text{ К}$ наблюдается также резкий спад интенсивности. Значит, кристаллы с такой концентрацией примесных ионов невыгодно использовать при измерении высоких давлений и температур. Большой рост полуширины при увеличении температуры наблюдается в образце №1 ($0,75\%$), по сравнению с образцом №2 ($0,71\%$). Однако следует обратить внимание на то, что при этом интенсивность спектров люминесценции рубина с большей концентрацией хрома остается значительно выше, чем у образца №2 вплоть до $T=423\text{ К}$. Вследствие этого из исследуемых кристаллов наиболее пригодным рубином для регистрации температуры по его спектрам люминесценции является образец №1.

Смещение максимумов спектров люминесценции рубинов в длинноволновую область при увеличении как температуры, так и концентрации объясняется изменениями, происходящими в кристаллических решетках образцов: параметры кристаллической решетки a и c увеличиваются.

С помощью ПЭВМ и программы GPRO были найдены функции, описывающие зависимость длины волны, интенсивности и полуширины R_1 -линии от температуры в образцах рубина с различной концентрацией хрома. Изменение полуширины от температуры можно описать функцией вида:

$$\Delta\nu(T) = \Delta\nu_0 + (AT)^b, \quad (1)$$

где $\Delta\nu$ — полуширина R_1 -линии (см^{-1}); $\Delta\nu_0$ — полуширина линии для данного кристалла при 0 К ; A — const, определяемая для каждого образца отдельно; T — температура (К); b — показатель степени, определяющий скорость роста $\Delta\nu$ при изменении температуры.

Постоянные $\Delta\nu_0$, A и b приведены в табл.2. По параметру b можно говорить о скорости уширения R -линии при увеличении температуры.

В ряде работ [8–10] измерение высоких температур предлагается производить также и по сдвигу R -линии. Для оценки этого предложения в работе была построена еще одна показательная функция, но описывающая теперь зависимость сдвига R_1 -линии от температуры:

$$\Delta\lambda_{R_1}(T) = (DT)^n, \quad (2)$$

где $\Delta\lambda_{R_1}$ – сдвиг максимума R_1 -линии относительно максимума при $T=77$ К; $D = \text{const}$, определяемая для каждого образца отдельно; n – показатель степени, определяющий скорость роста $\Delta\lambda$ при изменении температуры.

При высоких температурах, когда R_1 и R_2 -линии полностью перекрываются, сдвиг измерялся относительно максимума общей (R_1+R_2) -линии, по методике, предложенной в работах [8–10].

Значения D и n для каждого образца приведены в табл.2. Графическая зависимость сдвига линии от температуры показана на рис.2. При сравнении графиков каждого образца видно, что быстрее сдвигается в длинноволновую область спектр кристалла с большей концентрацией хрома.

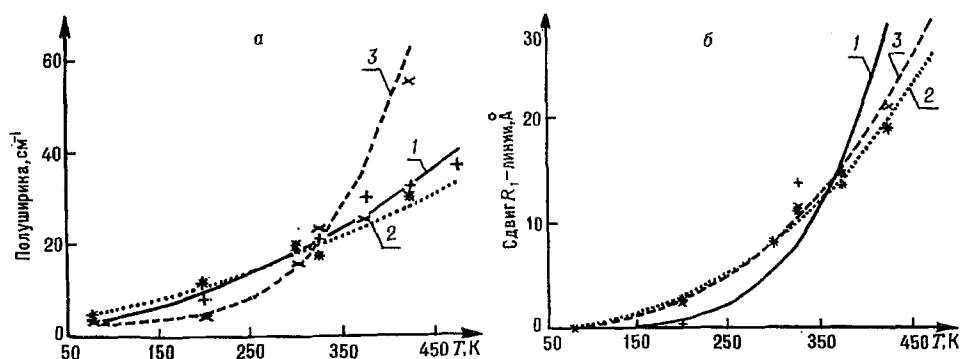


Рис.2. Температурные зависимости полуширины (а), смещения (б) R_1 -линии люминесценции кристаллов рубина; номера кривых соответствуют номерам образцов; экспериментальные точки образцов: 1 – +, 2 – *, 3 – x

Как было указано ранее, в выборе наиболее пригодного из исследуемых кристаллов рубина большую роль играет интенсивность их спектров люминесценции. Для ее описания в нашем случае можно использовать только значения интенсивности линий при высоких температурах ($299 \text{ К} < T < 423 \text{ К}$), так как экспериментальные исследования только в этом диапазоне проводились при неизменных условиях. При этом зависимость интенсивности от температуры оказалась практически линейной и ее можно описать функцией:

$$I(T) = h + k \cdot T, \quad (3)$$

где $I(T)$ – интенсивность линий; T – температура; h и k – постоянные коэффициенты, которые определены и приведены в табл.2. Коэффициенты h и k показывают скорость падения интенсивности линии люминесценции в различных образцах рубина.

Таблица 2

Параметры функций, описывающих поведение полуширины, интенсивности и сдвига линий люминесценции трех образцов рубина

Образец	$\Delta\nu_{\text{в}} \text{ см}^{-1}$	A	b	D	n	h	k
1	2,80	0,0096	2,53	0,0046	5,29	2,543	–0,005
2	2,68	0,0057	4,64	0,0077	2,52	2,737	–0,062
3	3,40	0,0160	1,65	0,0072	2,75	2,743	–0,063

На основании экспериментальных данных по исследованию поведения спектров люминесценции различных кристаллов рубина от температуры можно сделать следующие выводы: зависимость полуширины и сдвига линий рубина от температуры описывается показательной функцией, наиболее устойчивые и интенсивные линии люминесценции при изменении температуры принадлежат кристаллу рубина с содержанием хрома 0,75%, наличие *N*-линий сильной интенсивности в низкотемпературных спектрах кристаллов с большим содержанием Cr^{3+} дает возможность использовать спектр люминесценции этой области в таких установках, где необходимо измерение очень низких температур при высоких давлениях.

1. Свиридов Д.Т., Смирнов Ю.Ф. Теория оптических спектров ионов переходных металлов. М., 1977.
2. Свиридов Д.Т., Свиридова Р.К., Смирнов Ю.Ф. Оптические спектры ионов переходных металлов в кристаллах. М., 1976.
3. Арсеньев П.А., Свиридов Д.Т. Кристаллография. 1969. №14. С.687.
4. Феофилов П.П., Тимофеева В.А., Толстой М.К., Беляев Л.М. // Оптика и спектроскопия. 1965. Т.19. С.817.
5. Свиридов Д.Т., Севастьянов Б.К. и др. // Там же. 1973. Т.35. Вып.1. С.102.
6. Бокша О.Н., Варина Т.М., Попова А.А. Кристаллография. 1972. Т.15. С.5.
7. Прингсхейм П., Фогель М. Люминесценция жидких и твердых тел. М., 1948.
8. Гёттель, Мао, Белл. // ПНИ. 1985. №7. С.127.
9. Hiroshi Iwasaki, Shiego Sueno, Osamu Shimomura. New modification of the high-temperature X-rays diamond-anvil press and an accurate method of pressure-temperature determination. Tokyo, 1986.
10. Павловский А.И., Таценко О.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т.12. Вып.22. С.35

Поступила в редакцию 24.06.96.

УДК 621.382.537.33:621.317

А.Д.АНДРЕЕВ, А.М.БЕЛЬСКИЙ, А.А.ВАЛИЕВ

ОСОБЕННОСТИ ВАХ МОП-ПТ С ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ ПОДЛОЖКОЙ

The current-voltage characteristics of the MOSFET with a highly-doped substrate have been measured. It has been shown that the onset voltage for the channel current saturation is smaller than the effective gate voltage, and it increases with temperature. These peculiarities may be caused by an increase in the electrical field, decrease in the electron mobility near the drain region or by the drift velocity saturation.

Необходимость исследования параметров МОП-ПТ с высоким уровнем легирования подложки может быть вызвана следующими факторами: применением транзисторов в качестве тестовых элементов при измерении концентрации примесей в высоколегированных компонентах интегральных схем и конструктивно-технологическими требованиями повышения уровня легирования для предотвращения сквозного обеднения в короткоканальных приборах. Одним из таких параметров является напряжение стока, при котором ток в канале транзистора насыщается. Как показано в [1], это напряжение на порядок меньше эффективного напряжения затвора для уровня легирования подложки ($\sim 10^{24} \text{ м}^{-3}$). В данной работе измеренные значения напряжения насыщения тока в канале сравниваются с расчетными при различных концентрациях примесных атомов.

Уравнение вольтамперной характеристики (ВАХ) МОП-ПТ в омической области имеет вид [2,3]:

$$I = \mu C_0 \frac{W}{L} \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{V_D^2}{2} \right], \quad (1)$$