

ЭПР и ИК СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ АМОРФНЫХ ПЛЕНОК $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$

Б. А. НАДЖАФОВ

*Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана
AZ 1143, Баку, пр. Г.Джавида, 31 а*

В данной работе исследованы электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) и спектры инфракрасных поглощений (ИК) плёнок $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$, ($x=0;1;0,4$), полученных методом плазмо-химического осаждения, толщиной до $1\mu\text{m}$. Наблюдаемый спектр поглощения ЭПР слева и справа описывается суперпозицией двух сигналов: с g – фактором $2,004\div 2,022$ и шириной линии $73\div 86\text{Гс}$, и $2,018\div 2,022$ и шириной линии $51\div 62\text{Гс}$, относящихся, соответственно, к кремниевым и германиевым свободным связям. Также снимались спектры для плёнок $a\text{-Si:H}$, $a\text{-Ge:H}$ в отдельности после отжига при температуре $370\div 550^\circ\text{C}$, соответственно, при $g=2,003$.

Используя спектры ИК поглощения, определены концентрации водород-содержащих связей Si-H , Ge-H и силы осциллятора Γ в плёнках $a\text{-Si}_{0,60}\text{Ge}_{0,40}\text{:H}$.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в полупроводниковой электронике интенсивно изучаются аморфные гидрогенизированные плёнки твёрдых растворов $a\text{-Si}_{1-x}\text{H}_x$, $a\text{-Si}_{1-x}\text{N}_x\text{:H}$, $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, $a\text{-Ge}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$, $a\text{-Si}_{1-x}\text{O}_x\text{:H}$, а также $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$. Среди этих материалов состав $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ (где $x \leq 0,4$, $\text{H}=21\text{ат.}\%$) представляет наибольший интерес [1]. Исследованный в данной работе состав $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ представляет интерес для приборного использования в фотоэлементах, где плёнки этого состава используются для создания солнечных элементов [2,3].

Были проведены исследования ЭПР и ИК спектров пленок $a\text{-Si}_{0,60}\text{Ge}_{0,40}\text{:H}$, $a\text{-Si:H}$ и $a\text{-Ge:H}$. Исследования по такой методике позволяют получить данные о роли водорода в понижении плотности дефектов в $a\text{-Si:H}$, $a\text{-Ge:H}$ и $a\text{-Si}_{0,60}\text{Ge}_{0,40}\text{:H}$.

Известно, что аморфные плёнки без гидрогенизации обладают довольно высокой плотностью состояний в запрещенной зоне [4,5]. Чтобы уменьшить количество этих состояний, в плёнку добавляют водород или получение плёнки осуществляют в водородной среде. Количество водорода, внедряемого в плёнку, играет важную роль. Однако в литературе аморфные гидрогенизированные плёнки $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ исследовались недостаточно. Поэтому настоящая работа посвящена исследованию ЭПР и ИК измерениям плёнок $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ (где $x=0;1;0,4$).

ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы, изучаемые в этой работе, получались методом плазмохимического осаждения толщиной до $1\mu\text{m}$ при температуре подложки $T_s=200^\circ\text{C}$, скорость осаждения материала на подложку была 3Å/с , а расстояние между мишенью и подложкой $L=25\text{см}$. Мишенью служили пластинки кристаллического сплава $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ диаметром $60\div 63\text{мм}$ (где $x=0;1;0,4$). Нарастивание пленок производилось примерно в течение одного часа. Получение пленок производилось при различных парциальных давлениях водорода ($0,6\div 3,0\text{мТор}$). При этом каждая пленка характеризуется разным содержанием водорода.

В качестве подложек были использованы кристаллический Si для ИК измерений и алюминиевая фольга для ЭПР измерений. Спектры ЭПР для образцов снимались на радиоспектрометре РЭ-1306 с рабочей частотой $9,4\text{ГГц}$ ($\lambda=3,2\text{см}$) при температуре 80К . Параметры спектров ЭПР и концентрация парамагнитных центров определялись по эталону Mn^{2+} в решетке MgO . Спектры ИК пропускания измерялись в спектрометре ИКС-29 при частоте $1800\div 500\text{см}^{-1}$ при комнатной

температуре. Механизм растворения водорода изучался путем измерения поглощения инфракрасного (ИК) излучения, связанного с различными колебаниями связей Si–H или Ge–H. Концентрация водорода определялась ИК поглощением и методами эффузии. Нагревание образца в замкнутом объёме происходит из-за того, что материал образца почти полностью распадается на составляющие его элементы при кристаллизации в температурном интервале $370\div 650^{\circ}\text{C}$, что вызывает эффузию водорода. Относительная ошибка при определении концентрации водорода составляет $10\div 12\text{ ат.}\%$. Коэффициент поглощения α вычисляется по методике, приведенной в [6,7] с погрешностью $\pm 10\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Метод ЭПР оказался особенно ценным при исследовании аморфного кремния и германия и их сплавов. В материале, полученном без водорода, сигнал ЭПР всегда очень велик и достигает значения 10^{20} парамагнитных центров 1 см^3 со значением g -фактора 2,005 и $2,018\pm 0,002$ соответственно для кремния и для германия [8,10]. Кроме того, сигнал ЭПР сильно зависит от способа изготовления и особенно количества водорода в плёнках. Наблюдаемый ЭПР спектр в плёнках $a\text{-Si}_{0,60}\text{Ge}_{0,40}\text{:H}$, полученных методом плазмохимического осаждения, имеет асимметричную форму, поскольку состоит из двух видов, относящихся, соответственно, к свободным связям Si и Ge [Рис.1а]. Однако наблюдаемый сигнал не является простой суперпозицией этих двух сигналов (для Si и Ge), так как они сильно взаимодействуют между собой и получающийся в результате сигнал в промежуточном интервале стремится принять вид единственной линии. Поэтому наблюдаемые спектры слева и справа можно описать суперпозицией этих двух сигналов: с g -фактором $2,004\div 2,006$ и шириной линии $73\div 86\text{ Гс}$, $g=2,018\div 2,022$ и шириной линии $51\div 62\text{ Гс}$, относящихся к кремниевым и германиевым свободным связям, соответственно. С другой стороны, поведение свободных связей Si и Ge является неясным в температурной области $370\div 550^{\circ}\text{C}$. В этой температурной области ЭПР сигналы отличаются от свободных связей Ge:H и имеют значения g приблизительно 2,0036, которые являются меньшими по сравнению с нормальным значением $g=2,005$. ЭПР сигнал с $g=2,003$ наблюдается также в плёнках $a\text{-Ge:H}$ в указанной температурной области. Это связано, по-видимому, с загрязнением плёнок при нагревании в температурной области $370\div 550^{\circ}\text{C}$ [10]. Для $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ и $a\text{-Ge}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ значение g в зависимости от x снижается, соответственно от 2,005 и 2,018 до 2,003, т.е. от значения для свободных связей кремния и германия до соответствующего значения для углерода [8,10].

Другими словами, в системах Si-C и Ge-C, значения g для свободных связей Si или Ge уменьшаются при наличии атомов C, окружающих атомы Si или Ge [9]. Поэтому предполагается, что после отжига загрязнения в основном связаны с присутствием атомов углерода в пленке.

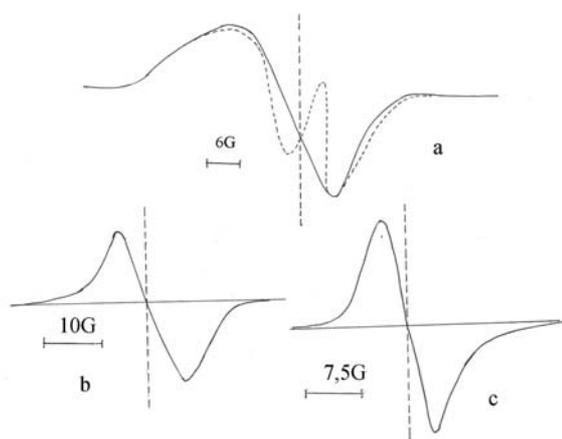
Рис.1.

Рис.1. Характерные формы линий ЭПР, снятых при температуре 80 К.

а) $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$, где $x=0,4$ и $\text{H}=21$ ат. %,

б) $a\text{-Si:H}$ до отжига $g=2,005$; после отжига при 550°C $g=2,003$.

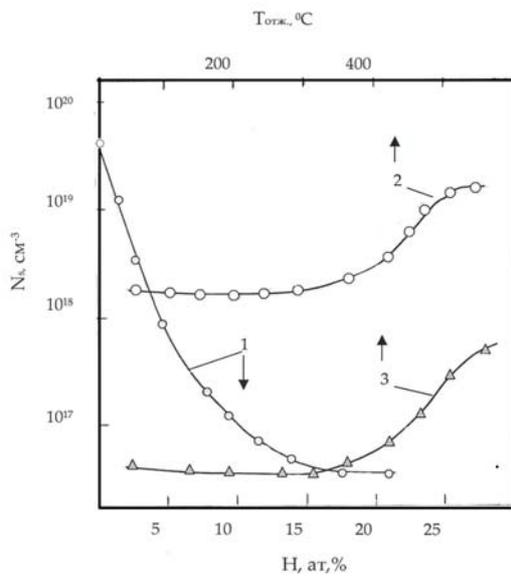
с) $a\text{-Ge:H}$ до отжига $g=2,018$; после отжига при 550°C $g=2,003$



На Рис.1(в,с) показаны характерные формы линии ЭПР $a\text{-Si:H}$ и $a\text{-Ge:H}$, снятые после отжига при температуре 550°C .

В работе [8] авторы также показывают, что за счет легирования бором и фосфором в запрещенной зоне появляются энергетические уровни связывающих и антисвязывающих состояний. Неспаренные спины существуют в антисвязывающем состоянии при отрицательном заряде и в связывающем состоянии при положительном заряде. При легировании фосфором и бором g -факторы имеют значения 2,004 и 2,011, соответственно.

На Рис.2 показана зависимость плотности спинов, связанных со свободными связями, от содержания водорода и температуры отжига для указанных пленок.



Видно, что с увеличением содержанием H концентрация парамагнитных центров (N_s) существенно уменьшается и достигает значения $7 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ (Рис.2, кривая 1). Свободные связи плотностью $7 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ могут быть полностью заполнены, если содержание H составляет около 21 ат. % для $a\text{-Si}_{0,60}\text{Ge}_{0,40}\text{:H}$ (кривая 1). Изменение плотности спинов для пленок $a\text{-Si:H}$ и $a\text{-Ge:H}$ выше 300°C является результатом выделения водорода (кривая 2 и 3).

Рис.2.

Зависимость спиновой плотности N_s свободных связей от содержания водорода (кривая 1) для $a\text{-Si}_{0,60}\text{Ge}_{0,40}\text{:H}$ и температуры отжига для аморфных плёнок, соответственно, $a\text{-Ge:H}$ и $a\text{-Si:H}$ (кривая 2,3).

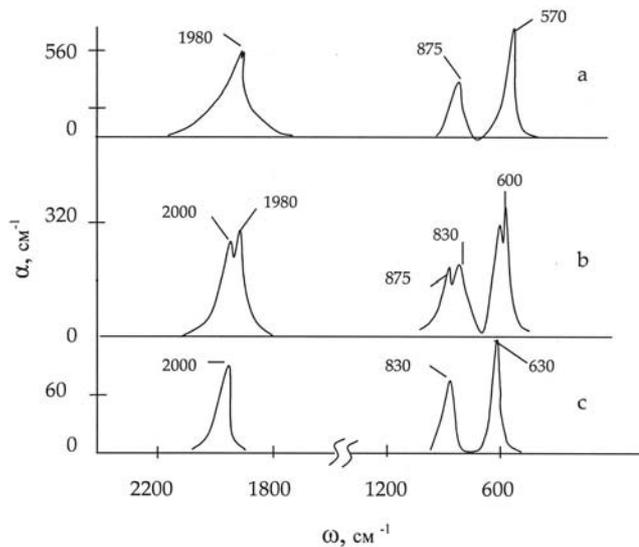
Измерение оптических и электрических свойств плёнок показывает, что в них имеется достаточно большое число парамагнитных центров, что подтверждается видом зависимости $\sigma(T)$ от $T^{1/4}$ в низкой температурной области [11], а также квадратичной зависимостью $(\alpha h\nu)^{1/2}$ от $h\nu$, теоретически полученной для модели Тауца, описывающей плотности состояний в щели подвижности [12]. В плёнках $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ по интенсивности сигнала определяется концентрация парамагнитных центров N_s по следующему соотношению:

$$N_s = \alpha N(\epsilon_f) kT, \quad (1)$$

которое однозначно дает значение плотности состояний при условии, что энергия корреляции между двумя электронами в запрещенной зоне намного меньше kT ($U \ll kT$), $N(\epsilon_f)$ – плотность состояний около уровня Ферми (порядка 10^{17}cm^{-3}) и $\alpha \approx 3$ [13]. Если же $U \gg kT$, то состояния, лежащие ниже ϵ_f , будут парамагнитными независимо от температуры. Указанные соотношения позволяют оценить плотность состояний в запрещенной зоне вблизи уровня Ферми. Однако в соответствии с расчетом молекулярных орбиталей в $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ наличие соседних с орбиталями атомов почти не меняет значение g ЭПР – сигналов от свободных связей как Si, так и Ge [14].

Число свободных связей зависит от механизма растворения H, который изучается путем измерения ИК поглощения, связанного с различными колебаниями связей Si-H или Ge-H. По ИК измерениям можно получить сведения о типе связей в системах SiH, SiH₂, SiH₃ и GeH, GeH₂, GeH₃. Однако из данных ИК поглощения нельзя сделать вывод о том, что однородно ли распределены эти

комплексы в плёнках или нет. С помощью измерения ИК поглощения определяется число водородсодержащих связей на основе этих комплексов и, используя эти данные, можно определить концентрацию водорода в плёнках. Коннелл и Павлик [15] показали, что атомы Н в плёнке а-Ge:H существуют в двух различных окружениях: одиночные атомы Н на изолированных дефектных состояниях и одиночные присоединения Н к дефектным состояниям Ge на внутренней поверхности поры. Такая интерпретация была основана на том, что в спектральном интервале от 700 до 900см⁻¹ исчезает ИК поглощение. Присоединение нескольких атомов Н к Ge в виде GeH₂ и GeH₃ даёт изгибную моду в вышеуказанном интервале. Подобное явление наблюдали авторы работ [6,16] при спектроскопическом исследовании локальной атомной структуры в сплавах а-Si_{1-x}H_x, т.е. возможно образование соединений типа SiH, SiH₂, SiH₃. Авторы работ [5,17] обнаружили, что моногидрид германия GeH даёт полосы поглощения при 1880см⁻¹, а дигидрид германия GeH₂ даёт полосы поглощения при 1980 и 830 см⁻¹. Полоса поглощения для моногидрида SiH соответствует 2000см⁻¹, а дигидриду SiH₂ соответствует 2100 и 875см⁻¹. Следует отметить, что вибрация изгиба для GeH и GeH₂ группы соответствует частоте 570см⁻¹, а вибрация изгиба для SiH₂ группы наблюдается при 630см⁻¹ [16-18]. Как видно из Рис.3а, пики, соответствующие полосам поглощения 1880 и 2000см⁻¹, относятся к валентным колебаниям (растяжениям) GeH, SiH, а пики при 830 и 875см⁻¹ соответствуют деформационным колебаниям GeH и SiH связей. Согласно [15], в плёнке а-GeH поглощение при 1980см⁻¹ связано с наличием GeH₂, а для плёнок а-Si_{0,60}Ge_{0,40}:H поглощение обуславливается наличием GeH связей. Следовательно, в плёнках а-Ge:H и а-Si:H поглощение при 2000 и 1980см⁻¹ обуславливается колебаниями валентных, а



поглощение при 630 и 570см⁻¹–колебаниями типа изгиба связи [Рис.3в,3с]. Таким образом, для а-Si_{0,60}Ge_{0,40}:H имеет место значительное перекрытие, которое наблюдается из спектров ИК поглощения как для полос растяжения GeH (1980см⁻¹) и SiH (2000 см⁻¹), так и для полос изгиба вблизи частоты 600см⁻¹ (Рис.3в).

Рис.3.

Спектры ИК поглощения аморфных плёнок а) а-Si:H б) а-Si_{0,60} Ge_{0,40}:H в) а-Ge:H.

Чтобы определить число водородсодержащих связей, необходимо рассчитать число атомных осцилляторов (N) в единице объёма пленки, которое определяется по методике Бродского и др [6]. Концентрация водорода в плёнке а-Ge:H и а-Si:H определяется с помощью уравнения [6,16,19]:

$$N_H = A_w I_w, \quad (2)$$

где $I_w = \int_{\omega_w} \frac{\alpha(\omega)}{\omega} d\omega$ является интегральным поглощением моды качания для плёнок а-Ge:H и а-Si:H. Для указанных плёнок соответственно $A_w = 1,1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ и $A_w = 1,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$.

Из приведенных данных можно оценить силу осциллятора в плёнке а-Si_{0,60}Ge_{0,40}:H из соотношения

$$\Gamma = I_s / I_w,$$

$$I_s = I_s^{(Ge)} + I_s^{(Si)} \quad (3a)$$

$$I_w = I_w^{(Ge)} + I_w^{(Si)}. \quad (3b)$$

Вычисленные таким образом значения силы осциллятора Γ приведены в Таблице 1. $I_s^{(Ge)}$, $I_s^{(Si)}$, $I_w^{(Ge)}$, $I_w^{(Si)}$ являются интегральными поглощениями моды растяжения и моды качания, которые определяются по данным Рис.3б. Для этой цели были взяты спектры ИК поглощения как для полос растяжения GeH (1980см^{-1}) и SiH (2000см^{-1}), так и для полос изгиба вблизи частоты 600см^{-1} (моды качания). Тогда $\alpha = (2 \div 3)10^2\text{см}^{-1}$. Полагая, что для изученных плёнок $A_w = 1,6 \cdot 10^{19}\text{см}^{-2}$ и $I_w^{(Ge)} + I_w^{(Si)}$, N_H можно вычислить с использованием интегральной силы I_w , при частоте моды качания 600см^{-1} , полученной из формулы (2). Соответственно после эффузии при термообработке ($360 \div 650^\circ\text{C}$) концентрация водорода C_H для a-Si_{0,60}Ge_{0,40}:H достигает 21 ат. %.

Таблица 1.

 Характеристические параметры аморфных плёнок a-Si_{1-x}Ge_x:H

№ плёнки	P_{H_2} (мТор)	E_0 (эВ)	C_H (ат.%)	N_H , см^{-3}	$N(\epsilon_f)$ см^{-3}	$I_s^{(Si)}$	$I_s^{(Ge)}$	$I_w^{(Ge)}$	$I_w^{(Si)}$	I_s/I_w
a-Si _{0,60} Ge _{0,40} :H	3,0	1,52	21	$7,3 \cdot 10^{21}$	$9,4 \cdot 10^{17}$	$1,1 \cdot 10^2$	10^2	$2,7 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^2$	0,47
a-Si:H	-	1,85		$2,9 \cdot 10^{22}$	$6,1 \cdot 10^{17}$	-	-	-	-	-
a-Ge:H	-	1,05		$4,6 \cdot 10^{21}$	$2 \cdot 10^{18}$	-	-	-	-	-

Удельные концентрации водородосодержащих связей определяются отношением их концентрации к числу атомов в 1см^3 данного материала; концентрация водородосодержащих связей Si-H, приходящихся на один атом Si ($[Si-H]/[Si]$), и Ge-H приходящихся на один атом Ge ($[Ge-H]/[Ge]$), оказались равными 0,58 и 0,10 для Si и Ge, соответственно.

Число водородосодержащих связей определяется по заданным значениям P_{H_2} и при $P_{H_2} = 3\text{мТор}$ для кремния получаем значение $N_{Si-H} = 2,9 \cdot 10^{22}\text{см}^{-3}$, для германия $N_{Ge-H} = 4,6 \cdot 10^{21}\text{см}^{-3}$, соответственно.

Это означает, что в процессе пассивации в плёнках a-Si_{0,60}Ge_{0,40}:H в свободных связях Ge участвуют не только водород Ge-H, но и большинство водородно-кремниевых связей Si-H [8,9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы спектры ЭПР и ИК поглощения гидrogenизированных аморфных плёнок a-Si_{0,60}Ge_{0,40}:H, a-Ge:H, а также a-Si:H, полученных методом плазмохимического осаждения.

Найдено, что при нагревании плёнок в температурной области $370 \div 550^\circ\text{C}$ ЭПР сигналы свободных связей Ge:H имеют различные g-значения до отжига, а после отжига их значения меняются и становятся приблизительно равными 2,003 и это значение является меньшим, чем нормальное g-значение: 2,005 для a-Si:H и 2,018 для a-Ge:H, соответственно.

Определяя число связей Si-H, а также число связей Ge-H по спектру ИК поглощения, утверждается, что удельные концентрации водородосодержащих связей $[Si-H]/[Si]$ и $[Ge-H]/[Ge]$ оказались равными 0,58 и 0,10. Из чего следует, что в плёнках a-Si_{0,60}Ge_{0,40}:H атомы H связываются преимущественно с атомами Si. Наблюдаемый ЭПР сигнал показывает, что в плёнках a-Si:H и a-Ge:H после отжига при температуре $370 \div 550^\circ\text{C}$ значение g-фактора для Si и Ge совпадают.

1. Practical Photovoltaics: *Electricity from Solar Cells* by Richard, J. Komp, John Perlin Aatec Pubns Publisher (2002) 197.
2. A.A.Sherchenkov, Semiconductors, **37** (2003) 763.
3. P.Rosales-Quintero, A.Torres-Jacome, R.Murphy-Artega and M. Landa-Vazques, *Semiconductors Science and technology*, **19** (2004) 366.
4. B.A.Najafov, Phys. St. Sol. (a), **114 K45** (1989) 47.
5. P.E.Schopp, M.Zeman, *Amorphous and microcrystalline silicon solar cells: modelling, materials and device technology*, Kluwer Academic Publishers, Boston – Bordrecht – London, (1998) 207.
6. M.N.Brodsky, Manuel Cardona and J.J.Cuomo, *Phys. Rev. B*, **16**. (1977) 3556.
7. B.A. Najafov, Ukr. Jour. Of Phys., **45** (2000) 1221.
8. H.Dersch, J.Stuke and J. Beichler, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **105** (1981) 265.
9. S.Bartelsen, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **81** (1977) 471.
10. Akiharu Morimoto, Takashi Miura, Minoru Kumeda and Totsuo Shimizu, *Japanese Journal of Applied Physics*, **20** (1981) 833.
11. Б.А.Наджафов, *ФТП*, **34** (2000) 1383.
12. J.Tauc, R.Crigorovici et al, *J. Non-Cryst. Sol.*, **15** (1966) 627.
13. Amorphous Semiconductors, 2nd ed., by M.H. Brodsky, (1990) 347.
14. N.Ishil, M.Kumeda and T.A.Shimizi, *Solid State Communications*, **41** (1982) 143.
15. G.A.N.Connel and J.R.Pawlik, *Phys. Rev. B*, **16** (1977) 3556.
16. H.Shanks, C.J.Fang, J.Ley, M.Cardona, F.Z.Demond, S.Kalbitzer, *Phys. Stat. Sol. (b)*, **100** (1980) 43.
17. R.A.Rudder, J.W.Cook, G.Lucovsky, *Appl. Phys. Lett.*, **45** (1984) 887.
18. W.Paul, D.K.Paul, Von B.Roedern, I.Blake, S.Oguz, *Phys. Rev. Lett*, **46** (1981) 1016.
19. C.J.Fang, K.J.Cruntz, J.Ley, M.Cardona, *J. Non-Cryst. Sol.*, **35** (1980) 131.

**BƏRK MƏHLULUN AMORF TƏBƏQƏSİNİN EPR VƏ
İNFR QIRMIZI UDULMA SPEKTRİNİN TƏDQIQI**

B.A. NƏCƏFOV

Məqalədə qalınlığı 1 µm olan plazma-kimyəvi cökmə metodu ilə alınmış a-Si_{1-x}Ge_x:H (x=0; 1; 0,4) təbəqəsində EPR və infra qırmızı udulma spektri öyrənilmişdir. Müşahidə olan EPR udulma spektri sol və sağ signal olmaqla iki signalın superpozisiyasından ibarətdir: g-faktor g=2,004÷2,006 və xəttin eni 73÷86G və g=2,018÷2,022 və xəttin eni 51÷62G uyğun olaraq, silisium və germaniumun sərbəst əlaqələri ilə bağlıdır.

Həmcinin a-Si:H və a-Ge:H təbəqələrinin 370÷550°C temperaturda tovladıqdan sonra uyğun olaraq g=2,003 olur.

İnfr qırmızı (İQ) udulma spektrindən hidrogenli əlaqələrin konsentrasiyası təyin olunmuş, a-Si_{0,60}Ge_{0,40}:H təbəqəsində Si-H, Ge-H əlaqələrini bilməklə ossilyatorun gücü təyin edilmişdir.

**ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE AND IR ABSORPTION SPECTRA'S INVESTIGATION OF
AMORPHOUS a-Si_{1-x}Ge_x:H SOLID SOLUTION'S FILMS**

B.A. NAJAFOV

Electron paramagnetic resonance (ESR) and infrared (IR) absorption spectra of a-Si_{1-x}Ge_x:H (x=0;1;0,4) films with the thickness up to 1µm obtained by the plasma-chemical deposition method have been investigated. The observed ESR absorption spectra is given by a superposition of two signals, with g-factor of 2,004÷2,006 and the line width of 73÷86Gc and with g factor of g=2,018÷2,022 and the line width of 51÷62G, related respectively to silicon and germanium dangling bondings.

Spectra for a-SiH, a-Ge:H separately after annealing at temperature 370÷550°C respectively with g=2,003 have also been taken.

Using IR absorption spectra concentrations of hydrogen-containing Si-H,Ge-H bonds and oscillator's strengths in a-Si_{0,60}Ge_{0,40}:H films have been determined

Редактор: Э.Гусейнов