

УДК 621.315.692

Оптические свойства эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Sn_xSe<In>$

Э. Ю. Салаев, И. Р. Нуриев, Х. Д. Джалилова, Н. В. Фараджев
Институт фотоэлектроники АН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

Исследован край оптического поглощения эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Sn_xSe$ ($x = 0,07$), легированных индием, в количестве $N_{In} \leq 0,8$ мас. %. Наблюдаемый сдвиг края собственного поглощения в сторону коротких длин волн интерпретируется наличием уровня индия, находящегося у края зоны проводимости, приводящей, по-видимому, к некоторому увеличению ширины запрещенной зоны E_g в $Pb_{1-x}Sn_xSe$. Установлено, что в области слабого поглощения край междозонного поглощения в $Pb_{1-x}Sn_xSe<In>$ обусловлен непрямыми оптическими переходами и описывается кривой $\sqrt{K} = f(E)$. Вычислены величины E_g и dE_g/dT .

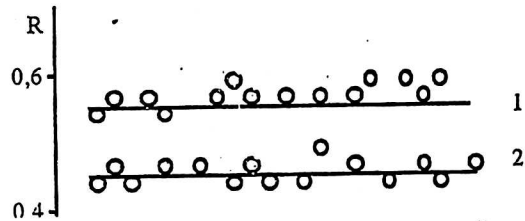
Полупроводниковые твердые растворы $Pb_{1-x}Sn_xSe$ ($x = 0,07$) в последние годы применяются в различных областях ИК-техники и являются перспективными материалами для оптоэлектроники. Оптические свойства монокристаллов $Pb_{1-x}Sn_xSe$ исследованы в ряде работ [1, 2], однако природа оптических переходов в области края собственного поглощения окончательно не выяснена. В связи с этим в настоящей работе исследован край оптического поглощения в эпитаксиальных пленках $Pb_{1-x}Sn_xSe$ как не легированных, так и специально легированных индием ($\leq 0,8$ мас. %).

Эпитаксиальные слои $Pb_{1-x}Sn_xSe$ выращивались на свежесколотых подложках BaF_2 {111} методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) со средней скоростью роста $5 \div 10$ Å/с при температуре подложки $T = 653-673$ К. Для снижения концентрации носителей и уменьшения вакансий пленки легировались донорной примесью индия. Легирование индием производилось в едином технологическом цикле в процессе роста слоев, а также при синтезе образцов $Pb_{1-x}Sn_xSe$, использовавшихся в качестве источника. После завершения процесса выращивания пленки подвергались гомогенизирующему отжигу в течение 10 мин при температуре 623 К. Значения полуширины рентгенодифракционных кривых качания $W = 100-150''$, электронограммы и электронно-микроскопические снимки этих пленок показали, что структурное совершенство легированных индием эпитаксиальных слоев $Pb_{1-x}Sn_xSe$ находятся на уровне лучших монокристаллов. Выращенные эпитаксиальные слои в зависимости от температуры подложек и скорости роста имели толщину 0,6—2 мкм, n - p -тип проводимости, концентрацию носителей заряда $5 \cdot 10^{15} \div 10^{16}$ см⁻³, подвижность $\mu = 3 \cdot 10^4$ см²/В·с (77 К). Для определения спектральной зависимости коэффициента поглощения в области края основного поглощения измерялись оптическое пропускание $D(\lambda)$ и отражение $R(\lambda)$ (рис. 1) и по полученным данным вычислялся коэффициент поглощения.

Измерения спектров отражения, полученных на двухлучевом спектрофотометре UR-20 с помощью отражательной приставки, показали, что коэффициент отражения $R(\lambda)$ постоянен во всей измеряемой ИК-области спектра (0÷15 мкм) при $T = 77 \div 300$ К и имеет величину $R = 0,45$. Это значение $R(\lambda)$ принималось при вычислении $K(\lambda)$ в области края основного поглощения.

Спектры пропускания эпитаксиальных слоев измерялись на однолучевом спектрометре ИКС-21 при $T = 77-300$ К. Коэффициент поглощения $K(\lambda)$ вычислялся по формуле $K(\lambda) = 1/d \ln \left[(1-R)^2 / 2D + \sqrt{(1-R)^4 / 4D^2 + R^2} \right]$, где d — толщина пленок.

Рис. 1. Спектры отражения эпитаксиальных пленок $Pb_{0,93}Sn_{0,07}Se:In$ (кривая 1) и $Pb_{0,93}Sn_{0,07}Se$ (кривая 2) при $T = 300$ К



На рис. 2 приведены спектры поглощения эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Sn_xSe$ толщиной $d \approx 0,8$ мкм на подложках $BaF_2 \{111\}$ как не легированных (кривая 1), так и легированных индием ($\leq 0,8$ мас. %) (кривая 2) при $T = 77$ К.

Как видно из рисунка, с введением In край собственного поглощения сдвигается в сторону коротких длин волн. По-видимому, это обусловлено наличием примесного донорного уровня, находящегося на глубине $\varepsilon = \varepsilon_c - (0,02-0,03$ эВ) в запрещенной зоне исследуемого материала.

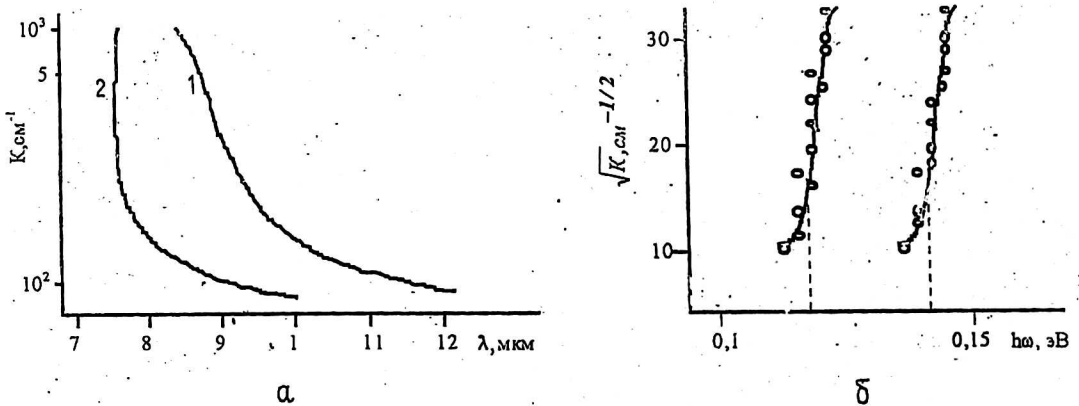


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента поглощения эпитаксиальных пленок $Pb_{0,93}Sn_{0,07}Se$ при $T = 300$ К в различных масштабах (а, б):
1 — $Pb_{1-x}Sn_xSe$ ($x = 0,07$); 2 — $Pb_{1-x}Sn_xSe$ ($x = 0,07$):In ($N_{In} = 0,7$ мас. %)

Исследования спектров поглощения эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Sn_xSe$ различных толщин (0,6–2 мкм) показали, что величина коэффициента поглощения не зависит от толщины эпитаксиального слоя, что обусловлено высоким структурным совершенством эпитаксиальных слоев, полученных с зеркально-гладкой поверхностью. Коэффициент поглощения K , начиная со значений $K \sim 10$ см⁻¹ вплоть до $K \sim 10^3$ см⁻¹, хорошо описывается прямой в координатах $K^{1/2} (h\omega)$ в области температур $T = 77-300$ К, что характерно для непрямых переходов и согласуется с данными, полученными для объемных монокристаллов $Pb_{1-x}Sn_xSe$ [3–5]. По экстраполяции значений $K^{1/2} (h\omega)$ к значению $K = 0$ определялась величина ширины запрещенной зоны E_g при

$T = 77-300$ К. Для $Pb_{0,93}Sn_{0,07}Se<In> - E_g = 0,144$ эВ (77 К), а для $Pb_{0,93}Sn_{0,07}Se - E_g = 0,12$ эВ (77 К). Аналогичное увеличение E_g в $Pb_{1-x}Sn_xSe$ при легировании индием ($In \leq 0,8$ мас. %) наблюдалось также при исследовании эффекта Холла и объяснялось наличием примесного уровня индия у края зоны проводимости [6]. В области сильного поглощения при $K > 10^3$ см⁻¹ проявляются прямые межзонные оптические переходы, сопоставляемые с зазором $L_6^+ - L_6^-$, и коэффициент поглощения хорошо описывается прямой в координатах $K^{1/2}(\hbar\omega)$ как и в случае нелегированных эпитаксиальных слоев $Pb_{1-x}Sn_xSe$ [7]. По-видимому, такая зависимость не может быть объяснена непрямыми переходами с поглощением длинноволновых фононов $\hbar\omega$, так как переходы, описываемые такой зависимостью, были обнаружены в [1] до 10,5 К, где оптические фононы в значительной степени выморожены. Одной из возможных причин, вызывающих непрямые оптические переходы в области слабого поглощения эпитаксиальных слоев $Pb_{1-x}Sn_xSe$, является появление сложной структуры валентной зоны вблизи точки L в $SnSe$ [1] и в твердых растворах $Pb_{1-x}Sn_xSe$ [5]. Температурная зависимость E_g в области температур 77–300 К носит линейный характер. Вычисленные значения температурного коэффициента ширины запрещенной зоны dE_g/dT составляют $(4-4,3) \cdot 10^{-4}$ эВ/К и хорошо согласуются с известными экспериментальными величинами этого коэффициента для объемных монокристаллов $Pb_{1-x}Sn_xSe$ [1]. Величины E_g и dE_g/dT также хорошо согласуются с соответствующими значениями, определенными из исследованных относительно спектрального распределения фоточувствительных эпитаксиальных пленок $Pb_{1-x}Sn_xSe$.

Литература

1. Антонов В. Б., Бабонас Г. А., Курбанова Э. И., Шмелейка А. Ю. Оптические спектры $Pb_{0,8}Sn_{0,2}Te$ и $Pb_{0,93}Sn_{0,07}Se$ //Литовский физический сборник. 1979. Т. 19. № 3. С. 373–380.
2. Straus A. I. Inversion of conduction and valence bands in $Pb_{1-x}Sn_xSe$ alloys//Phys. Rev. 1967. V. 157. № 3. P. 608–611.
3. Вейс А. Н., Гурьева Е. А., Нефедов О. Г., Прокофьева Л. В. Особенности спектров поглощения в p - $PbSe$ с изовалентными примесями замещения//ФТП. 1984. Т. 28. № 9. С. 1723–1726.
4. Вейс А. Н., Суворова Н. А. Энергетический спектр $Pb_{0,95-y}Sn_{0,05}Na_ySe$ по данным оптического поглощения//Там же. 1995. Т. 29. № 2. С. 278–285.
5. Вейс А. Н., Суворова Н. А. Исследование коэффициента оптического поглощения в компенсированном $PbSe<Na>$ //Там же. 1996. Т. 30. № 11. С. 2089–2097.
6. Salaev E. Yu., Nuriyev I. R., Jalilova Ch. J., Faradjev N. V. Peculiarities of growth and electro-physical properties of epitaxial films of $Pb_{1-x}Sn_xSe:In$ //International conference on Photoelectronics and Night Vision Devices — Moscow, Russia, State Scientific Center of the Russia Federation Rd&p. Center ORION. 1998. P. 164–166.
7. Антонов В. Б., Курбанова Э. И., Салаев Э. Ю. Исследование края собственного поглощения монокристаллов $Pb_{1-x}Sn_xTe(x = 0,02)$ и монокристаллических пленок $Pb_{1-x}Sn_xSe$ //Известия АН Азерб. ССР. Сер. ФТ и МН. 1979. № 4. С. 40–44.

Optical properties of $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}\langle\text{In}\rangle$ epitaxial films

E. Yu. Salaev, H. R. Nuriev, Kh. D. Jalilova, N. V. Faradjev
Institute of Foelectronics Azerbaijan Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

The optical absorption edge on the indium-doped ($N_{\text{In}} \leq 0,8$ weight. %) $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$ ($x = 0,07$) epitaxial layers have been investigated. The observed movement of intrinsic absorption edge in the short-wave length region spectrum is interpreted by the presence of indium impurity, which lead to some increasing of gap with E_g in $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}$. It has been found, that the inter-zone absorption edge in the weak absorption region $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Se}\langle\text{In}\rangle$ is conditioned by nondirect optic transitions. The magnitudes of E_g and E_g/dT have been calculated and are described by $\sqrt{K} = f(E)$ curve.