

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ p⁺-n СТРУКТУР InSb, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ЖФЭ

Ш.О. ЭМИНОВ

Институт Физики НАН Азербайджана

shikhamirem@gmail.com

Представлены количественные оценки электрических параметров подложки InSb ($n \approx 1 \div 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ и жидкофазных эпитаксиальных (ЖФЭ) слоев (ЭС) InSb ($p \approx 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) геометрических параметров p⁺-n перехода (толщина p-области ~1μm, а n-области более 160 μm), оптимальных для изготовления ИК-фотодиодов InSb с заданным уровнем обнаружительной способности(D*). Описана конструкция и методика изготовления эпитаксиального ИК-фотодиода InSb с $D^* \approx 4 \times 10^{11} \text{ смГц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$ при $\lambda = 5.5 \mu\text{m}$.

Ключевые слова: антимионид индия, жидкостная эпитаксия, ИК фотодиоды

PACS: 73.40.Kp, 78.20.-e, 78.66.Fd, 81.40.Tv

Диапазон длин волн 3-5 мкм был и остается одним из важнейших для большого числа ИК фотоприемных устройств военного и гражданского применения. Фотоприемные устройства этого спектрального диапазона изготавливаются в основном на основе антимионид индия [1,2]. Целью настоящей работы является оценка подходящих параметров исходных материалов и технологических режимов изготовления эпитаксиальных фотодиодов на основе InSb с применением жидкостной эпитаксии и описание методики получения основных характеристик фотодиода на основе p⁺-n переходов, выращенных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Это - один из основных современных методов получения эпитаксиальных структур, который наряду с другими методами широко используется в промышленном производстве оптоэлектронных приборов. Нами была разработана технология выращивания получения эпитаксиальных структур p-n и p⁺-p методом ЖФЭ на подложках InSb n-типа проводимости при легировании слоев кадмием [3]. Перед проведением экспериментальных исследований были проведены количественные оценки электрических параметров подложки InSb и эпитаксиальных слоев, геометрических параметров p⁺-n перехода (толщина p-и n-областей) оптимальных для изготовления ИК-фотодиодов InSb с заданным уровнем обнаружительной способности (D*) [4]. Обнаружительная способность является основной характеристикой фотодетектора и определяется формулой

$$D^* = \frac{\eta \lambda e}{2hc} \left(\frac{RA}{kT} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Здесь η – квантовая эффективность, λ -длина волны излучения, T - температура, R - дифференциальное сопротивление p-n перехода при нулевом смещении на фотодиоде. A- площадь фотодиода. В нашей статье [1] на основе формулы для диффузионного тока насыщения в n-области протекающего через

$$I_s = \frac{AeL_n n_p}{\tau_n} \left[\frac{\text{sh}\left(\frac{d}{L_n}\right) + \frac{S\tau_n}{L_n} \text{ch}\left(\frac{d}{L_n}\right)}{\text{ch}\frac{d}{L_n} + \frac{S}{L_n \tau_n} \text{sh}\frac{d}{L_n}} \right] + e \frac{L_p}{\tau_p} p_n \text{ch} \frac{b}{L_n} = I_s' + I_s'' \quad (2)$$

p-n переход и выражений для критической концентрации примеси в условиях вырождения

$$n = 4,8 \cdot 10^{15} \left(\frac{m_e}{m_0} \right)^{3/2} T^{3/2} F_{1/2}(\eta),$$

$$p = 4,8 \cdot 10^{15} \left(\frac{m_h}{m_0} \right)^{3/2} T^{3/2} F_{1/2}(-E_i - \xi)$$

было показано, что оптимальными значениями концентрации электронов в подложке с n-типом проводимости и дырок в p- слое при 77К являются, соответственно,

$$n < 2.7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} \text{ и } p \approx 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}.$$

Здесь S – скорость поверхностной рекомбинации; d – глубина залегания p-n- перехода; b – расстояние между переходом и тыльным контактом, расположенным в n-области; n_p и p_n – равновесная концентрация электронов в p-области и дырок в n-области, соответственно; e- заряд электрона, τ_n - время жизни электронов; L_p и L_n - диффузионная длина дырок в n-области и электронов в p- области,

$$\xi = \frac{E_F - E_c}{kT}, \quad m_e = 0.013m_0 \text{ и } m_h = 0.55m_0 -$$

эффективные массы электронов и дырок для InSb, m_0 - масса свободного электрона, E_F -уровень Ферми, E_i - собственная ширина запрещенной зоны в единицах kT , а $F_{1/2}(\eta)$ -интеграл Ферми-Дирака. Обычно принимается, что $S < 10^4 \text{ cm/s}$. Поскольку

$$L_n / \tau_p = \frac{2.44 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-10}} = 1.22 \cdot \frac{10^6 \text{ cm}}{s}, \text{ то } \frac{S}{L_n / \tau_p} \ll 1$$

можно привести выражении (2) к виду

$$I_s = Ae \frac{L_n}{\tau_n} n_p \left(\frac{sh \frac{d}{L_n}}{ch \frac{d}{L_n}} \right) = Ae \frac{L_n}{\tau_n} n_p \operatorname{th} \left(\frac{d}{L_n} \right)$$

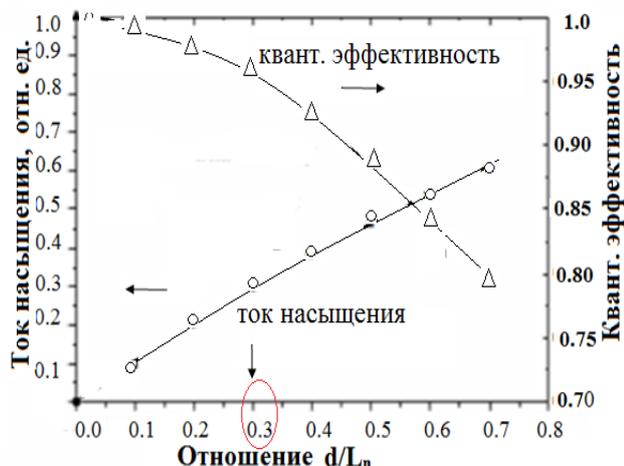


Рис.1. Расчетные зависимости квантовой эффективности и тока насыщения

Выражение (1) для η можно представить в виде

$$\eta = \frac{(1-r)}{ch \frac{d}{L_n} + \frac{S}{L_n/\tau_n} sh \frac{d}{L_n}} \propto \frac{1}{ch \frac{d}{L_n}}$$

Здесь $r = (36 \%)$., коэффициент отражения в InSb и его можно свести к минимуму при помощи антиотражающего покрытия. Величина d является одним из основных факторов, определяющих характеристики фотодиода. На рис.1 представлены графики зависимостей $\eta(\frac{d}{L_n})$ и тока насыщения $I_s(\frac{d}{L_n})$ от d/L_n . Из них видно, что $\eta \geq 95.7\%$ и минимально возможные значения I_s достигаются при $d/L_n \leq 0.3$. Поэтому можно получить $d \leq 0.73$ мкм.

Таким образом, толщину $d \approx 1$ мкм можно принять в качестве оптимальной толщины выращиваемого эпитаксиального слоя. Диффузионный ток I_s неосновных носителей в n -области (т.е. в подложке) зависит от расстояния b от перехода до контакта, расположенного на задней поверхности. Для уменьшения этой составляющей тока необходимо, чтобы значение $ch \frac{b}{L_p}$ приближалось к его минимальному значению, равному единице. Если $b = 2L_p$, то $ch \frac{b}{L_p} = 1.037$, что близко к единице.

Поэтому должно удовлетворяться условие $b \geq 2L_p$. Для подложки с $n = 1 - 2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ значение для b составит $b \geq 160$ мкм. Обычно в качестве подложек используются пластины с толщиной не меньшей 300-400 μm , что полностью отвечает этому условию. С учетом результатов произведенных оценок нами были выращены эпитаксиальные p^+ -слои на подложках InSb с n (легирована Te) и p -типом (компенсирована Ge) проводимости. Толщина эпитаксиальных была 1-10 мкм, а концентрация

дырок находилась в пределах $p \approx 1 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ в зависимости от уровня акцепторного легирования C_L раствора-расплава In-Sb кадмием. Было установлено, что в области слабого легирования $C_L < 1 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ концентрация дырок зависит от типа легирующей примеси подложки InSb (Te или Cd).

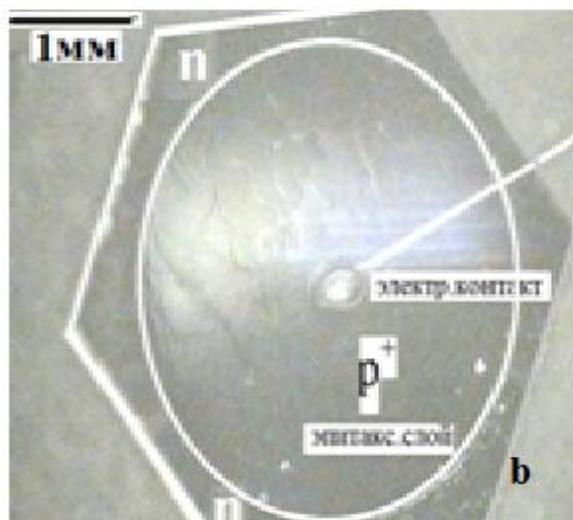
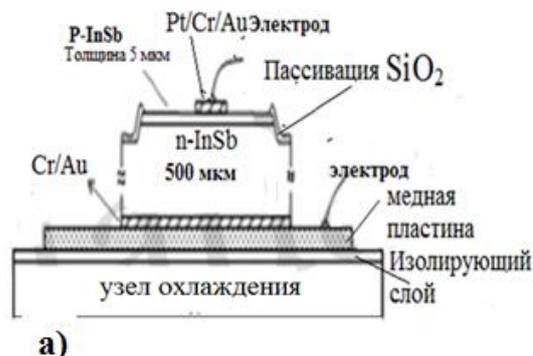


Рис. 2. Конструкция (а) и фотография (б) p^+ -n фотодиода InSb

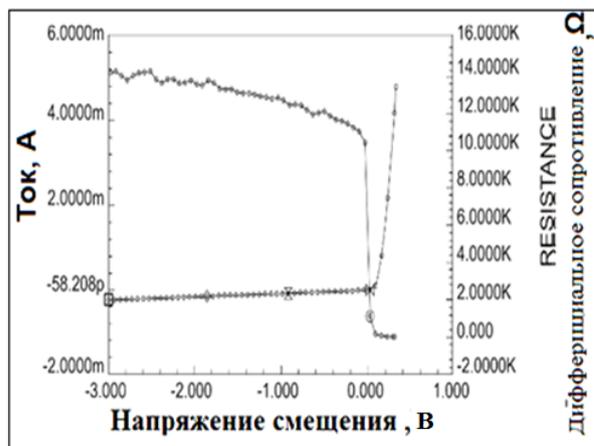


Рис. 3. Темновая ВАХ и дифференциальное сопротивление p -n фотодиода

В области $C_L \approx 1 \times 10^{17} - 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ величина K_s составляет ~ 0.30 , а в области $\approx 5 \times 10^{18} - 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ $K_s \sim 0.25$. На основе выращенных эпитаксиальных структур

нами были разработаны и изготовлены фотодиоды, этапы изготовления которых описаны ниже. Конструкция эпитаксиального p-n фотодиода из InSb с указанием составных частей показана на рис.2а., а фотоснимок готового фотодиода с толщиной эпитаксиального слоя 5 мкм и диаметром фоточувствительной площадки ~3 мм- на рис.2.б. На поверхности эпитаксиальной p-n структуры с размерами 10 мм x 20 мм с применением фотолитографии были созданы несколько заготовок фотодиодов эпитаксиального слоя. Для предотвращения закороток p и n-областей по поверхности на этой структуре химическим травлением была вытравлена “меза-структура” с соответствующей изолирующей канавкой и произведена изоляция поверхности тонким слоем SiO₂ методом плазмо-химического парового

осаждения (CVD). После скрайбирования заготовки из материнской пластины пассивирующий слой каждого фотодиода защищался от воздействия окружающей среды механически и химически устойчивым негативным фоторезистом.

Тыльная сторона ФД также была пассивирована SiO₂. Затем на эпитаксиальный слой p-InSb была напылена трехслойная металлизация Pt (7000Å)/ Cr (3000Å) / Au (30000Å), а на подложку n-InSb был напылен двойной слой Cr (3000Å)/Au (30000Å), служащий омическим контактом.

На рис.3 показаны ВАХ и зависимость дифференциального сопротивления фотодиода от напряжения смещения. Расчет величины обнаружительной способности для этого ФД дал значение $D^* \approx 4 \times 10^{11} \text{ см}^2 \text{ В}^{-1/2} \text{ Гц}^{-1} (\lambda = 5.5 \mu\text{m})$.

-
- [1] A. Rogalski Infrared Detectors, 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2011, 898p.
- [2] К.О. Болтарь, П.В. Власов, и др. Характеристики серийных матричных фотоприемных устройств на основе антимонида индия формата 320×256 // Успехи прикладной физики, 2013, том 1, № 6, с 733-738
- [3] Gh. Sareminia, M. Hajian, H. Simchi, Sh. Eminov Characterisation of photodiodes, made from a p-type epitaxial layer grown on n-type InSb <111> by LPE method// Infrared Physics & Technology, 2010, 53, 5, p. 315-319
- [4] Ш.О. Эминов, Э.К. Гусейнов, А.А. Раджабли, Э.А. Мамедова Электрические свойства эпитаксиальных слоев и p-n-переходов из InSb, выращенных методом ЖФЭ // Fizika, 2008, т. XIV, №3, с. 101-106