

УДК 537.311.322

К. Ю. Гуга, В. Б. Сухоревый, М. Освальдовский

(Киев, Украина — Познань, Польша)

## МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ПЛЕНКАХ InSb

Исследованы полевые и температурные характеристики магниточувствительных элементов на пленках  $p$ -InSb с собственной проводимостью, работающих на основе магнитоконцентрационного эффекта, показаны их преимущества по сравнению с объемными элементами.

Магниточувствительные элементы (ЧЭ) с использованием магнитоконцентрационного эффекта (МКЭ) в объемных структурах Ge и InSb в настоящий момент хорошо исследованы и характеризуются высокой чувствительностью и быстродействием [1—3]. Однако, несмотря на это, их практическое применение ограничено, что объясняется прежде всего недостаточной их температурной стабильностью и технологическими трудностями организации массового производства из-за невозможности применения интегральных технологий для изготовления объемных датчиков. Дальнейшее расширение областей и объемов применения магнитоконцентрационных ЧЭ возможно лишь в случае перехода от объемного их исполнения к пленочному. В то же время в литературе отсутствуют сообщения о таком исполнении ЧЭ на базе МКЭ. Применение же пленочных элементов дало бы возможность продвинуться по пути микроминиатюризации полупроводниковых устройств, снижения потребляемой ими мощности, уменьшения затрат на их производство. Сложившаяся ситуация вызвана прежде всего тем, что не удавалось синтезировать пленки с достаточной степенью чистоты, которые бы характеризовались собственной или близкой к собственной проводимостью при  $T \sim 300$  К ( $n_i > N$ , где  $n_i$  — концентрация собственных носителей заряда,  $N$  — концентрация примеси). Собственная проводимость, т. е. наличие в пленке большого числа электронно-дырочных (ЭД) пар, является одним из важнейших условий реализации МКЭ, смысл которого заключается в изменении полного числа носителей заряда при перелокализации их по сечению кристалла под действием скрещенных электрического (E) и магнитного (B) полей. Изменение полного числа носителей заряда в этом случае происходит за счет рекомбинации и генерации ЭД-пар на гранях полупроводниковой пластины, характеризующихся большой  $S_-$  и малой  $S_+$  скоростями поверхностной рекомбинации [4]. При выносе носителей на грань с  $S_-$  их полное число становится ниже равновесного значения, что соответствует режиму истощения, а при выносе на грань  $S_+$  превышает равновесное значение, что соответствует режиму обогащения (см. вставку на рис. 1). Изменение концентрации в общем случае пропорционально уровням скрещенных E и B полей, зависит от толщины ЧЭ, а также от условий на гранях ЧЭ, т. е. от соотношения  $S_-/S_+$ . Исследования МКЭ в рассматриваемых здесь ЧЭ показали, что магнитное управление током значительно сильнее в режиме истощения, чем в режиме обогащения [5]. Это следует также из ВАХ, приведенных на рис. 1. В настоящей работе исследовались пленочные ЧЭ из  $p$ -InSb, выращенные на сапфировых подложках по технологии, подробно описанной в [6]. Рассогласование постоянных решетки обеспечивало на границе раздела «пленка—подложка» скорость поверхностной рекомбинации

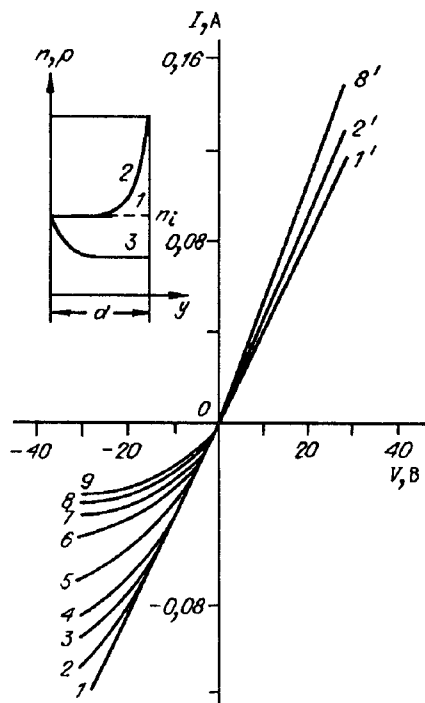


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики чувствительного элемента S4 при  $T = 235$  К в различных магнитных полях:

1, 1' -  $B = 0$ ; 2, 2' -  $B = 0,04T$ ; 3 -  $B = 0,08T$ ; 4 -  $B = 0,1T$ ;  
5 -  $B = 0,2T$ ; 6 -  $B = 0,3T$ ; 7 -  $B = 0,4T$ ; 8, 8' -  $B = 0,5T$ ;  
9 -  $B = 0,6T$ . На вставке: профиль распределения концентрации носителей заряда по сечению ЧЭ при МКЭ: 1 -  $B = 0$ ; 2, 3 -  $B \neq 0$  (2 - режим обогащения; 3 - режим истощения)

$S_- \sim 10^8$  м/с. Свободная поверхность пленок травилась в стандартном полирующем травителе СР-4, что давало  $S_+ \sim 10^6$  м/с. Скорость поверхностной рекомбинации пленок, как и в [7], определялась по фотомагнитному эффекту. Параметры ЧЭ приведены в табл. 1. Улучшение параметров пленок (повышение подвижности путем уменьшения поликристалличности) по сравнению с [6, 7] достигалось, как и в [5], зонной плавкой пленок под специальным покрытием. Измерялась чувствительность элементов в режиме обогащения и истощения, а также ее зависимость от тем-

пературы. Оценки проводились в традиционных для магниточувствительных приборов единицах:

$$\gamma_V = \frac{\Delta V}{\Delta B} \left[ \frac{B}{T} \right]; \quad I = \text{const} \text{ — вольтовая чувствительность,}$$

$$\gamma = \frac{\Delta V}{I \Delta B} \left[ \frac{B}{A \cdot T} \right]; \quad I = \text{const} \text{ — приведенная чувствительность.}$$

Остановимся на анализе ЧЭ в режиме истощения как более предпочтительном в смысле повышенной чувствительности к магнитному полю, так и более выгодном с энергетической точки зрения в связи с меньшими потребляемыми токами из-за увеличения сопротивления элемента (уменьшение числа носителей заряда). Анализ проведем при импульсном питании, обеспечивающем возможность подачи на ЧЭ больших  $E$  без разогрева его рабочего тела. Длительность питающих импульсов  $t = 1 \cdot 10^{-5}$  с, частота  $f = 10 \div 40$  Гц.

На рис. 2, а, б приведены зависимости  $\gamma_V$  от индукции магнитного поля в пленке S4 при  $T = 235$  и 300 К соответственно. Видно, что максимальные значения при малых токах питания достигаются только в области больших магнитных полей, где имеет место наложение на МКЭ магнитосопротивления. Это и понятно, так как малым значениям токов питания соответствуют и малые поля  $E$ , и как следствие для достижения хорошо развитого МКЭ следует применять большие  $B$ . В случае увеличения тока питания (увеличение  $E$ )

Таблица 1

Параметры ЧЭ	$d$ , м	$N$ (77 К), $\text{м}^{-3}$	$\mu_p$ (77 К), $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$\mu_n$ (300 К), $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	$R$ (300 К), Ом
S4	$6 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{21}$	$2,4 \times 10^7$	$4,8 \times 10^8$	52
2СК5	$2,2 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{21}$	$1,8 \times 10^7$	$5,2 \times 10^8$	180
S1	$1,8 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{21}$	$2,3 \times 10^7$	$4,2 \times 10^8$	182



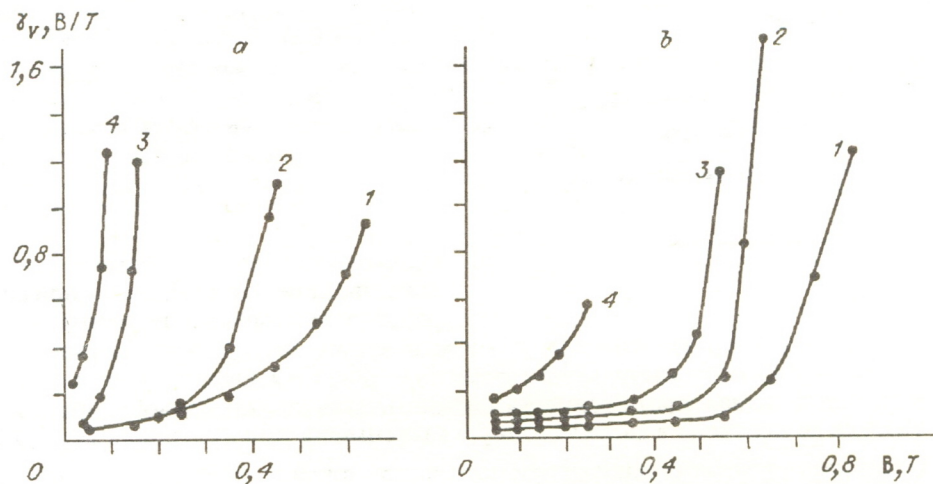


Рис. 2. Вольтовая  $\gamma_V$  чувствительность ЧЭ — S4 при различных токах питания (импульсный режим):

a —  $T = 235$  К: 1 —  $I = 0,03$ ; 2 —  $I = 0,04$ ; 3 —  $I = 0,05$ ; 4 —  $I = 0,07$  А; б —  $T = 300$  К: 1 —  $I = 0,14$ ; 2 —  $I = 0,175$ ; 3 —  $I = 0,2$ ; 4 —  $I = 0,35$  А

максимальные значения  $\gamma_V$  достигаются уже в области малых В (см. рис. 2, а, кривые 3, 4). Аналогичный характер имеет и приведенная чувствительность  $\gamma$ , параметры которой даны в табл. 2.

С повышением температуры в пленках возрастает концентрация собственных носителей заряда ( $n_i$ ), что затрудняет истощение их объема и приводит к необходимости повышения управляющего воздействия  $E \times B$ . Как следствие этого,  $\gamma_V$  при  $T = 300$  К (см. рис. 2, б) достигает своих максимальных значений в больших магнитных полях. Аналогичный характер  $\gamma_V$  имели и в других исследуемых ЧЭ. В табл. 2 приведены параметры этих ЧЭ при различных температурах. Для импульсного питания параметры даны в строках с индексом «И». Для сравнения приводятся параметры объемных ЧЭ из InSb и Ge на основе МКЭ, а также датчиков Холла из InSb. Проводились также исследования ЧЭ при постоянном питании. Естественно, что во избежание разогрева ЧЭ их рабочие токи были на порядок меньше, чем в случае импульсного питания. Применение малых  $E$  приводит к снижению чувствительности датчиков.

Таблица 2

Параметры ЧЭ	Материал	Питание	$\gamma_V$ , В/Т		$\gamma$ , В/А · Т		$I$ , А		Литература
			$T = 200$	$T = 300$	$T = 200$	$T = 300$	$T = 200$	$T = 300$	
			S4	$p$ -InSb (пленка)	И	1,0	1,4	20,0	
S1	То же	И	—	0,4	—	3,0	—	0,12	—
2СК5	»	И	0,34	0,18	21,0	1,7	0,016	0,11	—
S4		П	—	0,4	—	13,8	—	0,029	—
S1		П	—	0,15	—	18,7	—	0,008	—
2СК5		П	—	0,05	—	6,25	—	0,008	—
	$i$ -InSb (монокристалл)	И	6,0	5,0	200	0,50	0,7	1,0	[2]
	InSb (Холл)	П	—	—	—	2,0	—	0,0075	[8]

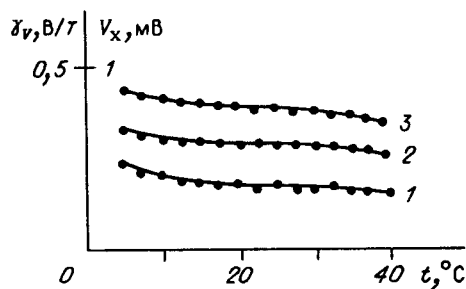


Рис. 3. Температурная зависимость вольтовой чувствительности  $\gamma_V$  (кривые 2, 3) в режиме истощения и холловского напряжения  $V_X$  (кривая 1) ЧЭ — S4 при постоянном напряжении питания  $V$  в слабом магнитном поле  $B = 2 \cdot 10^{-3} T$ :  
1, 2 —  $V = 1,5$ ; 3 —  $V = 2,5$  В

Однако постоянное питание может оказаться предпочтительным при разработке конкретных измерительных систем. Характер зависимости  $\gamma_V$  от магнитного поля в этом случае аналогичный, как и для импульсного питания на рис. 1 и 2. Однако существенным является большая протяженность по магнитным полям первого линейного участка до перехода в сверхлинейную зависимость при значениях  $B \sim 1,0 T$ .

Параметры чувствительности при постоянном питании приведены в табл. 2 в строках с индексом «П». Значительный интерес при разработке магнито-чувствительных приборов представляет температурная стабильность ЧЭ, определяющая выбор конструктивных решений термостабилизации ЧЭ в измерительной схеме. Особо существенной становится термостабильность при работе ЧЭ в пороговых режимах чувствительности. В связи с этим были проведены исследования термостабильности ЧЭ в слабых магнитных полях. Результаты измерений представлены на рис. 3, кривые 2, 3. Там же представлена термостабильность холловских ЧЭ (кривая 1), изготовленных из того же материала, что и ЧЭ на основе МКЭ. Видно, что, обладая достаточно высокой чувствительностью в данных условиях эксплуатации, ЧЭ характеризуются сравнимой с датчиками Холла термостабильностью. Следует отметить, что полученная термостабильность значительно выше, чем в объемных ЧЭ из InSb [2, 3]. Это связано с тем, что рассматриваемые здесь пленочные ЧЭ имеют поликристаллическую блочную структуру и температурная зависимость подвижности носителей заряда определяется в них рассеянием на границах зерен. Такой характер рассеяния обуславливает меньшую степень в температурной зависимости подвижности ( $\mu \sim T^p$ ), чем в объемных образцах, где рассеяние осуществляется на акустических фононах.

Из сопоставления параметров, приведенных в табл. 2, видно, что пленки InSb обладают приемлемой чувствительностью даже по сравнению с объемными элементами InSb. При этом несомненным их достоинством является то, что рабочие токи в них почти на порядок ниже, чем в объемных элементах. По сравнению с объемными элементами из Ge, где рабочие токи также малы, у пленок InSb значительно шире температурный диапазон чувствительности.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что пленочные ЧЭ на основе МКЭ по своим характеристикам не хуже объемных и в то же время позволяют использовать интегральные технологии изготовления, что существенно облегчает их массовое производство и применение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроны в полупроводниках. Т. 2. Полупроводниковые преобразователи /Под общ. ред. Ю. Пожелы. Вильнюс: Моклас, 1980.
2. Малютенко В. К., Гуга К. Ю. Магнито-чувствительные элементы на основе InSb. Ч. I (Обзор) // Оптоэлектроника и полупроводниковая техника. 1983. Вып. 4.
3. Малютенко В. К., Гуга К. Ю., Кислый В. П. Магнито-чувствительные элементы на основе InSb. Ч. II (Обзор) // Там же. 1984. Вып. 6.
4. Welker H. Zur Theorie der galvanomagnetischen Effekte bei gemischter Leitung // Z. Naturforschung. 1951. 6a. P. 184.
5. Maljutenko V. K., Guga K. Yu., Kisly V. P., Oszwaldowski M. Magnetoconcentration effect in p-InSb thin films // Acta Physica Polonica. 1990. A77. P. 421.

6. Oszwaldowski M. The mobility of charge carriers at room temperature in InSb thin films regrown from the melt // Thin Solid Films. 1979. 56. P. 331.
7. Hanus W., Oszwaldowski M. The dependence of photoconductive and photoelectromagnetic effects on stub thickness in InSb at room temperature // Phys. Stat. Solidi(a). 1976. 36. P. 445.
8. Кобус А., Тушинский А. Датчики Холла и магниторезисторы. М.: Энергия. 1971.

*Поступила в редакцию 7 мая 1993 г.*

---

---

---

**Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!**