

# ДИНАМИЧЕСКАЯ ПЕРЕСТРОЙКА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Е.Дмитриев

**С**пектральная чувствительность фотоприемных устройств – один из основных параметров, определяющих возможность использования этих устройств в конкретных приложениях. Эта характеристика может быть как односпектральной (однооконной, используемой в одном диапазоне оптического спектра), так и мультиспектральной (многооконной, используемой в нескольких спектральных диапазонах). Мы уже писали об односпектральных [1] и мультиспектральных [2] фотоприемных устройствах, отмечали гибкость мультиспектральных устройств, вызванную наличием нескольких окон/диапазонов их применения. Однако фотоприемное устройство становится идеально гибким, если его спектральный диапазон может перестраиваться в соответствии с требованиями, заданными приложениями. Отзывы направлять по адресу: [nslepov@online.ru](mailto:nslepov@online.ru)

В статье рассмотрена возможность перестройки диапазона спектральной чувствительности фотоприемников (ФП) и оптических фильтров (ОФ) благодаря изменению электрического режима (для приемников) или воздействию полей различной физической природы (магнитных, электромагнитных и электростатических). Оценена также целесообразность применения тех или иных эффектов и режимов в практических конструкциях многоспектральных ФП, учитывая воздействие спецфакторов на стабильность диапазона спектральной чувствительности ФП и спектрального пропускания ОФ.

## ДИНАМИЧЕСКАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ОБЛАСТИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФП ФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ

Под динамической перестройкой области спектральной чувствительности понимается быстродействующее изменение положения максимума чувствительности  $\lambda_{\text{макс}}$ , управляемое физическим полем.

Поскольку  $\lambda_{\text{макс}}$  зависит от ширины запрещенной зоны п/п материала чувствительного элемента ( $\epsilon_G$ ), то перестройка достигается благодаря зависимости  $\epsilon_G$  от  $\vec{X}$ , где  $\vec{X}$  – фактор поля, воздействующего на материал чувствительного элемента, имеющий в общем случае векторный характер.

Рассмотрим зависимость края зоны собственного поглощения в полупроводниках от внешних физических полей.

### ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Одной из основных является линейная зависимость  $\epsilon_G(T)$ :

$$\epsilon_G(T) = \epsilon_G(0) - \alpha \cdot T.$$

Здесь,  $\epsilon_G$  – ширина запрещенной зоны, равная ( $\epsilon_c - \epsilon_v$ ), где  $\epsilon_c$  – дно зоны проводимости;  $\epsilon_v$  – верх валентной зоны, а  $\alpha = \partial(\epsilon_G)/\partial T$  – коэффициент изменения ширины запрещенной зоны от температуры.

Для материала InSb:

$$\partial(\epsilon_G)/\partial T = \Delta\epsilon_G \text{ K}^{-1} = -0,28 \text{ мЭВ} \cdot \text{K}^{-1} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ мкм} \cdot \text{K}^{-1} = 12 \text{ нм} \cdot \text{K}^{-1}, \text{ а } \Delta\epsilon_{G-\text{InSb}} = 0,167 \text{ эВ при } 300\text{K}.$$

При этом изменение длины волны спектральной чувствительности определяется зависимостью:

$$\Delta\lambda = -h \cdot c \cdot \epsilon_G^{-2} \cdot \Delta\epsilon_G = -1,24 \epsilon_G^{-2} \cdot \Delta\epsilon_G.$$

Здесь  $\Delta\lambda$  измеряется в микронах, а  $\epsilon_G$  и  $\Delta\epsilon_G$  – электрон-вольтах. Тогда изменение  $\Delta\lambda$  от температуры определяется выражением:

$$\Delta\lambda/\Delta T = -1,24 \epsilon_G^{-2} \cdot \Delta\epsilon_G \Delta T^{-1}.$$

Для материала InAs:

$$\partial(\epsilon_G)/\partial T = \Delta\epsilon_G \text{ K}^{-1} = -0,28 \text{ мЭВ} \cdot \text{K}^{-1} = 2,67 \cdot 10^{-3} \text{ мкм} \cdot \text{K}^{-1} = 2,67 \text{ нм} \cdot \text{K}^{-1}, \text{ а } \epsilon_{G-\text{InAs}} = 0,36 \text{ эВ при } 300\text{K}.$$

Если учесть, что температурная зависимость удельной обнаружительной способности  $D^*(T)$  приемника из InSb характеризуется снижением  $D^*$  на 20% при изменении  $T$  от 80 до 120 K, то при таком изменении  $\Delta T$  можно достичь перестройки длины волны  $\Delta\lambda$  на 0,48 мкм.

Для материала Ge:

$$\partial(\epsilon_G)/\partial T = -0,43 \text{ мЭВ} \cdot \text{K}^{-1} = 1,2 \text{ нм} \cdot \text{K}^{-1}, \text{ а } \epsilon_{G-\text{Ge}} = 0,665 \text{ эВ при } 300\text{K}.$$

Для материала Si:

$$\partial(\epsilon_G)/\partial T = -0,28 \text{ мЭВ} \cdot \text{K}^{-1} = 0,28 \text{ нм} \cdot \text{K}^{-1}, \text{ а } \epsilon_{G-\text{Si}} = 1,12 \text{ эВ при } 300\text{K}.$$

Для таких полупроводников, как PbS, PbSe и PbTe, коэффициент  $\alpha$  положителен.

Для материала фоторезистора PbS  $\lambda_{\text{макс}}$  изменяется от 3,4 до 4,8 мкм при изменении температуры от 295 до 77K, то есть  $\partial(\epsilon_G)/\partial T$  для PbS составляет  $6,4 \cdot 10^{-3}$  мкм  $\text{K}^{-1}$ . Однако при изменении температуры от 295 до 77K  $D^*(T)$  изменяется от  $2 \cdot 10^9$  до  $5 \cdot 10^{10}$  см $\cdot$ Гц $^{1/2}$ ·Вт $^{-1}$ , то есть больше, чем на порядок.

Для материала Cd $_x$ Hg $_{1-x}$ Te зависимость  $\epsilon_G(x,T)$  определяется

нижеприведенным эмпирическим соотношением:

$$\epsilon_G(x,T) = -0,3424 + 1,838x + 0,1488x^4 + [7,68 \cdot 10^{-4}T + 6,29 \cdot 10^{-2}] \cdot [(1 - 2/14x)/(1 - x)].$$

Для  $x = 0,22$ ,  $\partial(\epsilon_G)/\partial T = -64,7 \text{ мкЭВ} \cdot \text{K}^{-1} = 3,73 \cdot 10^{-3} \text{ мкм} \cdot \text{K}^{-1} = 3,73 \text{ нм} \cdot \text{K}^{-1}$ , а  $\epsilon_G(x=0,22, T=300\text{K}) = 0,1466 \text{ эВ}$ .

$$\text{Тогда } \lambda_{\text{гр.}} = h \cdot c / \epsilon_G \approx 1,24 \cdot \epsilon_G^{-1} = 8,46 \text{ мкм}.$$

### ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ (ВСЕСТОРОННЕГО СЖАТИЯ)

Для материала GaAs в диапазоне  $0 \leq P < 60 \cdot 10^3$   $\partial(\epsilon_G)/\partial P = 9,4 \text{ мкЭВ} \cdot \text{атм}^{-1}$ , а для  $P \geq 60 \cdot 10^3$   $\partial(\epsilon_G)/\partial P = -8,7 \text{ мкЭВ} \cdot \text{атм}^{-1}$ .

$$\Delta\lambda/\Delta P = -1,24 \epsilon_G^{-2} \cdot \Delta\epsilon_G \Delta P^{-1}. \epsilon_{G-\text{GaAs}} = 1,43 \text{ эВ при } 300\text{K}.$$

$\Delta\lambda/\Delta P = -1,24 \epsilon_G^{-2} \cdot \Delta\epsilon_G \Delta P^{-1} = -5,7 \cdot 10^{-6} \text{ мкм} \cdot \text{атм}^{-1} = -5,7 \cdot 10^{-2} \text{ \AA} \cdot \text{атм}^{-1}$  ( $0 \leq P < 60 \cdot 10^3 \cdot \text{атм}$ ).

$\Delta\lambda/\Delta P = -1,24 \epsilon_G^{-2} \cdot \Delta\epsilon_G \Delta P^{-1} = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ мкм} \cdot \text{атм}^{-1} = 5,3 \cdot 10^{-2} \text{ \AA} \cdot \text{атм}^{-1}$  ( $P \geq 60 \cdot 10^3 \cdot \text{атм}$ ).

### ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Учитывая соотношения:

$$\epsilon_G(B) = \epsilon_G(0) - \alpha B; \epsilon_G(B) = \epsilon_G(0) + (e\hbar/2m_r) B_z,$$

где  $m_r = m_n m_p / (m_n + m_p)$  – приведенная масса, для материала InAs получим:

$\partial(\epsilon_G)/\partial B = \Delta\epsilon_G \text{ T}^{-1} = 1,1 \text{ мЭВ} \cdot \text{T}^{-1}$ , где  $B$  – магнитная индукция,  $T$  – Тесла (единица магнитной индукции В);

$$\epsilon_{G-\text{InAs}} = 0,36 \text{ эВ при } 300\text{K}.$$

$\Delta\lambda/\Delta B = -1,24 \epsilon_G^{-2} \cdot \Delta\epsilon_G \Delta B^{-1} = -10,5 \cdot 10^{-3} \text{ мкм} \cdot \text{T}^{-1} = -10,5 \cdot \text{нм} \cdot \text{T}^{-1}$ .

### ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Сдвиг 10 мЭВ достигается приложением электрического поля напряженностью  $E \sim 5 \cdot 10^4 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ , т.е.  $-2 \cdot 10^{-4} \text{ мЭВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{см} = -0,2 \text{ мкЭВ} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{см}$ .

$\Delta\lambda/\Delta E = -1,24 \epsilon_G^{-2} \cdot \Delta\epsilon_G \Delta E^{-1}$ , где  $E$  – напряженность электрического поля.

Для материала InSb:

$$\epsilon_{G-\text{InSb}} = 0,167 \text{ эВ при } 300\text{K}, \Delta\lambda/\Delta E = 8,9 \cdot 10^{-2} \text{ \AA} \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{см}.$$

Пересчетные формулы и основные физические величины

Перевод в $\Delta\lambda/\Delta X_i$	Основные физические величины
Коэффициент удельной перестройки, выражаемый в длинах волн излучения на единицу физической величины фактора $\lambda = h \cdot c / E; E = \epsilon_G;$	$h = 6,62517 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} = 4,1357 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с};$
$\Delta\lambda/\Delta\epsilon_G = -h \cdot c \cdot \epsilon_G^{-2};$	$c = 2,99793 \cdot 10^{14} \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-1}$
$\Delta\lambda/\Delta\epsilon_G \Delta\epsilon_G / \Delta X_i = -1,24 \epsilon_G^{-2} \cdot \Delta\epsilon_G \Delta X_i^{-1}.$	$1 \text{ эрг} = 6,2419 \cdot 10^{11} \text{ эВ}$
$\lambda_{\text{гр.}} = h \cdot c / \epsilon_G \approx 1,24 \cdot \epsilon_G^{-1}, \lambda_{\text{гр.}}(\text{в мкм}); E(\text{в \AA}).$	$1 \text{ эВ} = 1,6021 \cdot 10^{12} \text{ эрг}$
	$h \cdot c = 1,24 \text{ эВ} \cdot \text{мкм}$

## ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗУЕМОСТЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ

Оценить техническую реализуемость способов динамической перестройки области спектральной чувствительности ФП физическими полями можно на основе метода "порогов". Он анализирует предельно допустимые значения тех факторов, которые не вызывают интенсивного дефектообразования в материале чувствительного элемента (ЧЭ) и/или его разрушения и могут обеспечить перестройку при длительной эксплуатации изделий.

Оценим возможности управления перестройкой спектральной чувствительности электрическим полем на примере приемников на основе InSb.

При воздействии электрического поля пороговым значением фактора является напряжение пробоя, характеризующее электрическую прочность материала. Эмпирическая зависимость электрической прочности для п/п диодных структур описывается формулой

$$U_{\text{проб}} \approx 60(\epsilon_G/1,1)^{1,5}(10^{16}/C_B)^{0,75} [3],$$

где  $\epsilon_G$  – ширина запрещенной зоны п/п материала ЧЭ;  $C_B$  – концентрация примеси в слаболегированной области р-п-перехода. Формула верна до значений  $C_B = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Для  $C_B > 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  действует механизм туннельного пробоя.

Для материала InSb имеем:

$$\epsilon_G(T=300\text{K}) = 0,167 \text{ эВ}; \epsilon_G(T=77\text{K}) = 0,229 \text{ эВ}; U_{\text{проб}}(C_B = 1 \cdot 10^{15}) \approx 20 \text{ В}; U_{\text{раб.}}(C_B = 1 \cdot 10^{15}) \approx 10 \text{ В (коэффициент запаса} = 2).$$

$$U_{\text{проб}}(C_B = 5 \cdot 10^{14}) \approx 22 \text{ В, а при } C_B = 1 \cdot 10^{14} U_{\text{проб}} \approx 112 \text{ В.}$$

$$\lambda_{\text{гр.}} = h \cdot c / \epsilon_G \approx 1,24 \cdot \epsilon_G^{-1}, \lambda_{\text{гр.}} \text{ (в мкм)}; E \text{ (эВ)}. \lambda_{\text{гр.}}(T=77\text{K}) = 5,4 \text{ мкм.}$$

Рассчитаем  $\Delta\lambda/\lambda$  для толщины слаболегированной области 10 мкм и рабочего напряжения перестройки 10 В.

$$\Delta\lambda(\Delta E=10 \text{ В}) = 0,0975 \text{ мкм}; \Delta\lambda/\lambda (\Delta E=10 \text{ В}) = 0,0975/5,4 = 0,018 = 1,8\%; \Delta\lambda/\lambda (\Delta E = 66 \text{ В}) = 11,88\%.$$

Воздействие электрического поля на материал ЧЭ ФП достигается подачей на диодную структуру отрицательного напряжения смещения. Оно на несколько порядков превышает обычное напряжение смещения, необходимое для работы фотоприемника в фотодиодном режиме. Однако относительно большое напряжение отрицательного смещения приведет (за счет возрастания темнового тока) к неприемлемому ухудшению основного показателя фотоприемника  $D^*$ .

### Оценка возможностей динамической перестройки спектральной чувствительности фотоприемников физическими полями различной природы

Материал ЧЭ фотоприемника, ширина запрещенной зоны $\epsilon_G$	Характеристика способа перестройки				Оценка технической реализуемости перестройки
	Воздействующий фактор физического поля	Удельный коэффициент перестройки	Достоинства	Недостатки	
Антимонид индия – InSb $\epsilon_G(T=300\text{K})=0,167 \text{ эВ}$	Температура (Т), К	$120 \text{ \AA} \cdot \text{K}^{-1} [1]$	Высокий удельный коэффициент перестройки	Большая инерционность, определяемая тепловой постоянной	Трудно реализуема для охлаждаемых фотоприемников
	Электрическое поле (Е), В·см <sup>-1</sup>	$8,9 \cdot 10^{-2} \text{ \AA} \cdot \text{В}^{-1} [1]$	Высокое быстродействие	Очень низкий удельный коэффициент перестройки	Реализуема для всех видов фотоприемников
Арсенид галлия - GaAs $\epsilon_G(T=300\text{K})=1,43 \text{ эВ}$	Гидростатическое сжатие (Р), атм	$-5,7 \cdot 10^{-2} \text{ \AA} \cdot \text{атм}^{-1}$ для $0 \leq P < 60 \cdot 10^3 \text{ атм}$ ; $5,3 \cdot 10^{-2} \text{ \AA} \cdot \text{атм}^{-1}$ для $P \geq 60 \cdot 10^3 \text{ атм} [1]$	–	Требует существенного увеличения массы и габаритов. Очень низкий удельный коэффициент перестройки	Трудно реализуема для всех видов фотоприемников
Арсенид индия – InAs $\epsilon_G(T=300\text{K})=0,36 \text{ эВ}$	Температура (Т), К	$26,7 \text{ \AA} \cdot \text{K}^{-1} [2]$	–	Большая инерционность, определяемая тепловой постоянной	Трудно реализуема для охлаждаемых фотоприемников
	Магнитное поле (В), Т	$-1,05 \text{ \AA} \cdot \text{T}^{-1} [1]$	Высокое быстродействие	Требует существенного увеличения массы и габаритов. Низкий удельный коэффициент перестройки	Трудно реализуема для фотоприемников (особенно охлаждаемых)
Германий – Ge $\epsilon_G(T=300\text{K})=0,665 \text{ эВ}$	Температура (Т), К	$12 \text{ \AA} \cdot \text{K}^{-1} [1]$	–	Большая инерционность, определяемая тепловой постоянной	Трудно реализуема
Кремний – Si $\epsilon_G(T=300\text{K})=1,12 \text{ эВ}$	Температура (Т), К	$2,8 \text{ \AA} \cdot \text{K}^{-1} [1]$	–	Большая инерционность, определяемая тепловой постоянной	Реализуема для неохлаждаемых фотоприемников
Сульфид свинца – PbS $\epsilon_G(T=295\text{K})=0,52 \text{ эВ}$	Температура (Т), К	$-64 \text{ \AA} \cdot \text{K}^{-1} [1]$	Высокий удельный коэффициент перестройки	Большая инерционность, определяемая тепловой постоянной	Реализуема для неохлаждаемых фотоприемников
Кадмий-ртуть-теллур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ ( $x=0,22$ ) $\epsilon_G(T=300\text{K})=0,1466 \text{ эВ}$	Температура (Т), К	$37,3 \text{ \AA} \cdot \text{K}^{-1} [3]$	–	Большая инерционность, определяемая тепловой постоянной	Трудно реализуема для охлаждаемых фотоприемников

## ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ СПЕЦФАКТОРОВ

Оценим кратко влияние спецфакторов на стабильность сохранения в требуемых пределах диапазонов спектральной чувствительности фотоприемников и спектрального пропускания оптических фильтров. Для такой оценки также эффективен метод "порогов".

Известно, что свойства п/п ФП подвержены воздействию спецфакторов ввиду сильной зависимости свойств п/п материалов от этих факторов. При этом самый низкий порог, с которого наблюдается изменение свойств материала, – это время жизни носителей заряда. Затем следует порог изменения концентрации носителей заряда. Самым же высоким является порог изменения подвижности.

С первым из порогов связано ухудшение квантовой эффективности приемников и, как следствие, – ухудшение их основного показателя  $D^*$ . Дegradация спектральной характеристики фотоприемника связана с последним из вышеуказанных порогов. Поэтому при воздействии спецфактора сначала наступает ухудшение  $D^*$ , а затем изменение спектральной характеристики ФП.

При оценке радиационной стойкости ФП необходимо учитывать, что различные физические структуры обладают разной восприимчивостью к воздействию ионизирующих излучений. Так, если биполярные структуры ФП в большей степени подвержены влиянию нейтронного потока, то МДП-структуры более чувствительны к воздействию гамма-излучения из-за увеличения плотности наведенного заряда в слое диэлектрика.

На радиационную стойкость существенное влияние оказывает материал ЧЭ фотоприемника и его конструктивные параметры, например толщины активных слоев, обладающих фотопроводимостью, и пассивных слоев, пропускающих принимаемое излучение.

В общем случае более высокой стойкостью обладают ФП на основе широкозонных материалов с тонкими слоями физических структур. Примером радиационно стойкого ФП на примесной фотопроводимости может служить кремниевый ФП с блокированием прыжковой проводимости на основе ВІВ-структуры (Blocked Impurity Band).

В меньшей степени на радиационную стойкость ФП действует режим их работы (фотодиодный или фотовольтаический), влияющий на механизмы переноса фотогенерированных носителей заряда – диффузионного или полевого.

Радиационная стойкость оптических фильтров, так же как и ФП, зависит от материалов подложек, рабочих слоев и их толщин. Оптические фильтры деградируют при воздействии гамма-излучения из-за образования в их материалах центров поглощения (центров окраски), которые приводят к снижению пропускания.

В наиболее распространенных многослойных интерференционных фильтрах пороги деградации их спектральных

характеристик могут не отличаться от порога деградации пропускания. Это обусловлено радиационным изменением действительной части комплексного коэффициента пропускания применяемых в них материалов.

В целом для различных видов ФП и оптических фильтров радиационное повреждение их спектральных характеристик отличается более высокими порогами по сравнению с порогами радиационного повреждения основных параметров – показателей назначения этих изделий.

## ВЫВОДЫ

1. Использование температурной и полевой (по электрическому полю) зависимости  $\varepsilon_G$  позволяет осуществить динамическую перестройку области спектральной чувствительности фотоприемников. Однако это сопряжено со значительным ухудшением показателя  $D^*$ . Кроме того, они не свободны от недостатков (см. таблицу).
2. Использование зависимости  $\varepsilon_G(P)$  требует всестороннего сжатия образца материала. Процесс можно реализовать на лабораторной установке, но он теряет смысл на практике при создании изделий для военной техники.
3. Использование зависимости  $\varepsilon_G$  от магнитного поля ( $B$ ) неприемлемо по причине значительных массогабаритных характеристик подобных устройств.

Этими обстоятельствами объясняется то, что в мировой практике нет примеров применения физических полей для динамической перестройки области спектральной чувствительности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Дмитриев Е.** Разработка элементной базы фотоприемных устройств отображения видеoinформации. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №2, с.74–79.
2. **Дмитриев Е.** Фотоприемные устройства для многоспектральных оптоэлектронных систем. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №8, с.36–41.
3. **Зеегер К.** Физика полупроводников. Пер. с англ. под ред. Ю.К.Пожелы. – М.: Мир, 1977.
4. **Овсяк В.Н.** и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. – Новосибирск: Наука, 2001.
5. **Курносое А.И., Юдин В.В.** Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем: – Уч. пособие для ВУЗов. – М.: Высшая школа, 1986.