

Radiants of noise of the InSb multi-element photodiodes

I. N. Miroshnikova, A. M. Gulyaev
Moscow Energy Institute, Moscow, Russia

Consideration is made to the problems of a manufacturing process optimization for the new developed device used in thermal imagers. This analysis takes into account the examinations of noise properties of devices manufactured now.

УДК 621.383

Субматричные фоторезисторы из гетероэпитаксиальных структур КРТ 0,1 эВ, полученных методом МЛЭ, с мультиплексором в холодной зоне

Е. В. Сусов, О. В. Смолин, И. Ю. Ларцев
ФГУП "Альфа", Москва, Россия

Ю. Г. Сидоров, В. С. Варавин, Н. Н. Михайлов
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Показано, что гетероэпитаксиальные структуры кадмий—ртуть—теллур (КРТ), полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), на подложке из GaAs вида GaAs—CdZnTe—Cd_xHg_{1-x}Te_{x=0,35-0,25}—Cd_xHg_{1-x}Te_{x=0,215-0,285}—Cd_xHg_{1-x}Te_{x=0,85} с рабочим слоем толщиной $d \leq 4$ мкм открывают возможности создания субматричных и матричных фоторезисторов, эффективность которых по перекрытию спектрального диапазона 8—14 мкм в 2 раза выше, чем у фотодиодных матриц. Рассмотрены особенности малоразмерных пикселей — фоточувствительной площади (ФЧП) $A \leq 30 \times 30$ мкм. Оптимальные величины времени жизни τ_{eff} КРТ лежат в диапазоне $(0,1-2,5) \cdot 10^{-7}$ с, обеспечивая высокие значения вольтовой чувствительности $S_v \geq 3 \cdot 10^5$ В/Вт при малых токах смещения $I_{dis} \sim (0,25-0,6) \cdot 10^{-3}$ А и потребляемой мощности субматрицы 288×2 (144×4) Р-45 мВт. Разработанный мультиплексор, работающий в холодной зоне ($T = 80$ К), потребляет не более 150 мВт.

Для малоразмерных площадей фоточувствительных элементов (пикселей) $A \leq 30 \times 30$ мкм целесообразно использовать гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) КРТ, полученные методом МЛЭ с толщиной рабочего слоя КРТ ≤ 4 мкм с временем жизни неравновесных носителей $\tau_0 = (1-2,5) \cdot 10^{-7}$ с, что позволяет получить высокие значения вольтовой чувствительности $\geq 3 \cdot 10^5$ В/Вт при малых токах смещения $(0,24-0,6) \cdot 10^{-3}$ А и снизить мощность, потребляемую ФЧЭ формата 288×2 (144×4) до ~ 10 мВт. Разработан кремниевый мультиплексор, стыкуемый с субматрицей фоторезисторов через индиевые столбики. Постоянная составляющая исключается с помощью мостовой схемы, в плечи которой включены пиксели, находящиеся вне светового потока.

Полученные методом МЛЭ на подложке из GaAs с буферным слоем CdZnTe ГЭС КРТ высокого качества, содержащие нижний варизонный слой КРТ, тонкий слой КРТ постоянного

состава $x \approx 0,215$, верхний варизонный слой КРТ и субмикронный слой КРТ постоянного состава, близкого к теллуриду кадмия, открыли возможности разработки многоэлементных, субматричных и матричных фоторезисторов.

Высокое сопротивление фоторезисторов $R = (250-450)$ Ом обеспечило высокую вольтовую чувствительность $S_{v, \lambda m} \geq (300-400) \cdot 10^3$ В/Вт, что позволило применить в зоне ФЧЭ КМОП мультиплексор для субматричного фоторезистора формата 288×2 (144×4); $A = 30 \times 30$ мкм (A — площадь пикселя), $\lambda_{co} \sim (12,5-13)$ мкм. Мощность тепловыделения при токах смещения $0,25 \cdot 10^{-3} \pm 0,6 \cdot 10^{-3}$ А, $R_T = 300$ Ом составляет $P_{FSE} \approx 45-250$ мВт; мощность, потребляемая мультиплексором, — $P_m = 150$ мВт. Постоянная составляющая исключается с помощью мостовой схемы. Соединение ФЧЭ с мультиплексором осуществляется методом гибридной сборки с индиевыми столбиками.

Гетероэпитаксиальные структуры КРТ

Структуры вида $\text{GaAs}-\text{CdZnTe}-\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}_{x=0,35-0,25}-\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}_{x=0,25\pm 0,003}-\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}_{x=0,25-0,85}-\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}_{x=0,85}$ (рис. 1), полученные методом МЛЭ, позволяют изготовить субматричные фоторезисторы с длинноволновой границей спектральной чувствительности $\lambda_{\text{со}} \sim (12,5-13)$ мкм, коротковолновой границей $\lambda_{0,7} \approx 8$ мкм, темновым сопротивлением $R_T \approx (250-450)$ Ом и высокой вольтовой чувствительностью $S_{u\lambda m} \geq (300-400) \cdot 10^3$ В/Вт при малых токах смещения $I_{\text{dis}} = (1,1-1,3) \cdot 10^{-3}$ А с использованием тонких эпитаксиальных слоев $d \leq 3-4$ мкм можно уменьшить ток смещения до $I_{\text{dis}} \leq (0,25-0,6) \cdot 10^{-3}$ А. Мощность тепловыделения одного пикселя $R_T = 300$ Ом составляет, соответственно, $1,9 \cdot 10^{-5}$ и $\sim 10^{-4}$ Вт. Суммарная мощность тепловыделения для субматрицы формата $288 \times 2 (144 \times 4)$ с учетом мостиков входной цепи составляет $\sum_{576 \times 4} P_{0,24} \sim 45$ мВт при одновременной подаче напряжения смещения на все пиксели. Эта величина не изменится при построчном включении смещения в процессе сканирования матрицы формата 576×576 . Мощность тепловыделения КМОП-мультиплексора, имеющего спектральную плотность шума $\sim (9-10)$ нВ·Гц^{-1/2} составит не более 150 мВт.

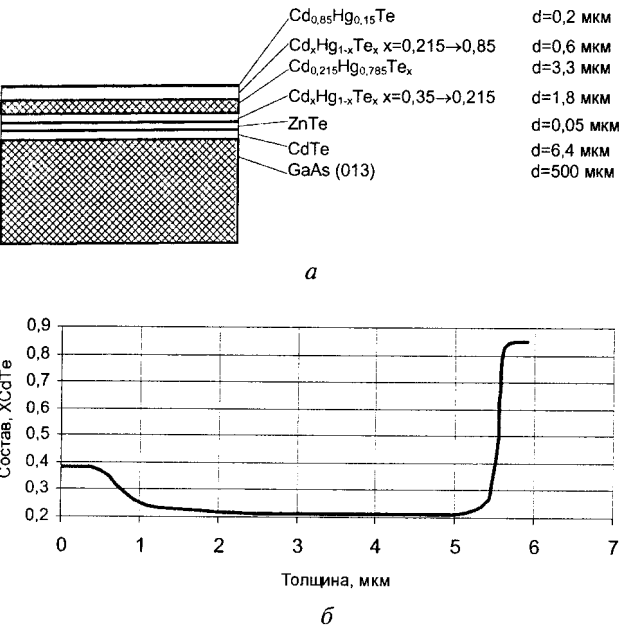


Рис. 1. Гетероэпитаксиальная структура КРТ, полученная МЛЭ: а — общий вид в разрезе; б — изменение состава по толщине ГЭС КРТ (измерение эллипсометром в процессе выращивания)

Особенности фоторезисторов с малоразмерными пикселями

В работах [1, 2] прсанализированы проблемы, связанные с явлением sweeps out ("выметания"

носителей) и влиянием омических контактов на фотоотклик в фоторезисторах 0,1 эВ КРТ n-типа. Развитие технологии изготовления объемных монокристаллов и эпитаксиальных слоев КРТ n-типа позволило получить образцы, обладающие высоким совершенством, с достаточно низкой концентрацией $n_{77} = (1,5-5) \cdot 10^{14}$ см⁻³, высокой подвижностью $\mu_{77} \geq 10^5$ см²/(В·с) и временем жизни неосновных носителей, определяемым механизмом ударной рекомбинации $\tau = (1-6) \cdot 10^{-6}$ с. Такой материал особенно хорош для изготовления фоторезисторов с обнаружительной способностью, ограниченной шумами фона, если размеры пикселей велики (≥ 100 мкм). Ситуация сильно меняется с переходом к размерам пикселя (25-30) мкм. Используя выражение для вольтовой чувствительности [2], получим

$$S_{u\lambda m} = \frac{\eta \tau_{eff} V_{dis}}{h \nu n W},$$

- где η — квантовая эффективность;
- τ_{eff} — эффективное время жизни;
- V_{dis} — напряженность смещения;
- h — постоянная Планка;
- ν — частота падающего излучения;
- n — концентрация носителей;
- W — объем пикселя (ФЧП).

Полагая $V_{dis} = \frac{L^2}{\tau_p \mu_a}$ (режим насыщения S_u

при "выметании"),

где μ_a — подвижность дырок,

и $\tau_{eff} = \tau_p \left(1 - \frac{1}{\cosh \frac{L}{2L_p}} \right) -$

для омических контактов,

где $L_p = \left(\frac{\mu_a k T \tau_0}{e} \right)^{1/2};$

k — постоянная Больцмана; e — заряд электрона, задаваясь значениями квантовой эффективности, известными параметрами ГЭС КРТ МЛЭ и размерами пикселя, были определены величины $S_{ихmax}$ в зависимости от тока смещения.

На рис. 2 показаны зависимости от тока смещения вольтовой чувствительности фоторезисторов из (ГЭС) КРТ МЛЭ для условий (1); (2) и (3); при толщине слоя КРТ $d = 4$ мкм, размерах пикселя $A = 30 \times 30$ мкм, концентрации носителей $n_{77} = 5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, $\eta = 0,7$ и $0,8$ для $\tau_0 = (5; 2,5; 1; 0,5) \cdot 10^{-7}$ с. Приведена также зависимость, полученная экспериментально для $A_{opt} = 50 \times 50$ мкм, $A_{el} = (50 \times 140)$ мкм и контактами n^+ (см. рис. 2 кривая 1). Из рис. 2 видно,

что для достижения значения вольтовой чувствительности, необходимой для стыковки с мультиплексором ($S_{ul\max} \geq 350 \cdot 10^3$ В/Вт), предпочтительнее использовать слои ГЭС КРТ с $\tau_0 \sim 10^{-7}$ с, так как в этом случае снижение вольтовой чувствительности омическими контактами при малых размерах пикселя (< 30 мкм) становится приемлемым, тогда как увеличение напряжения смещения и тока смещения до насыщения вольтовой чувствительности, связанное с уменьшением τ_0 , остается в пределах допустимого по величине рассеиваемой мощности ФЧЭ. Использование запирающих контактов n^+ , которое приводит к снижению явления выметания носителей, позволяет значительно повысить S_u , но при напряжениях смещения, выходящих за пределы допустимых для субматричных фоторезисторов. Это хорошо видно из рис. 2 (кривая 1).

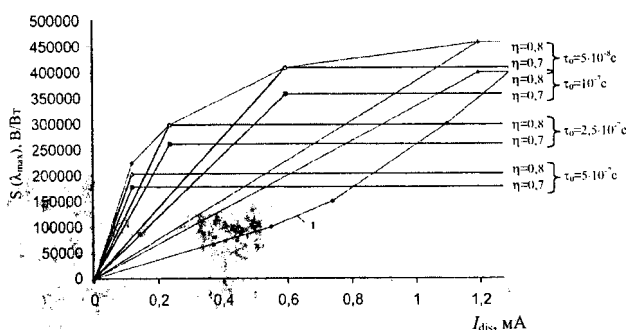


Рис. 2. Зависимость вольтовой чувствительности от тока смещения

Для обработки сигнала изображения квази-матричного фоторезистора формата 288×2 (144×4) был разработан кремниевый КМОП-мультиплексор, работающий при 80 К (холодная зона ФЧЭ), стыкуемый с ФЧЭ с помощью индиевых столбиков, выполняющий функции предварительного усиления и считывания сигнала и частичного оцифровывания.

На рис. 3 показана зависимость от частоты спектральной плотности напряжения шума канала усиления мультиплексора для тока питания 17 мкА. На частоте 100 Гц спектральная плотность шума мультиплексора при его охлаждении до $T = 80$ К, как видно из рис. 3, составляет ~ 10 нВ/Гц^{1/2}. Обнаружительная способность $D^*_{\lambda m}$ фоторезистора $A = 30 \times 30$ мкм с вольтовой чувствительностью $S_{ulm} = 300 \cdot 10^3$ В/Вт, ограниченная шумом мультиплексора, составит $D^*_{\lambda m} = 9 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Для субматричного фоторезистора формата 288×2 (144×4) два пикселя работают в режиме ВЗН, т. е. $D^*_{\lambda m}$ будет $(1,2 - 1,3) \cdot 10^{11}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹.

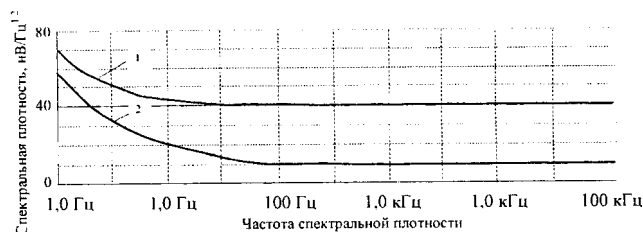


Рис. 3. Частотная зависимость спектральной плотности шума усилителя мультиплексора при токе питания 17 мкА: 1 — при температуре 27 °С; 2 — при 193 °С

Исключение постоянной составляющей осуществляется использованием мостиковой схемы, в которой три плеча не являются фоточувствительными, так как на эти пиксели, совпадающие по размерам и сопротивлению с рабочим пикселем, излучение не попадает. Возможно также включение трех необлученных пикселей, образующих мостик с рабочим пикселем, расположенных в конце ряда пикселей субматрицы последовательно к каждому рабочему пикселю. Такое включение используется и в болометрических матрицах. Гарантией баланса моста является высокая однородность слоев ГЭС КРТ МЛЭ по составу $\Delta x < 0,003$ мол. дол. и электрофизическим свойствам на размерах субматрицы: $L = 9$ мм, $b = 2,5$ мм. На рис. 4 показан вариант подключения ФЧЭ к усилителям мультиплексора.

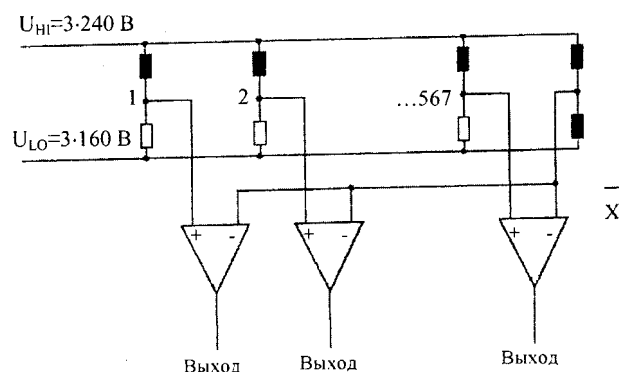


Рис. 4. Вариант включения усилителя мультиплексора

Преимущества субматричных и матричных фоторезисторов из ГЭС КРТ МЛЭ диапазона 8–14 мкм

Спектральные характеристики фоторезистора из ГЭС КРТ МЛЭ, фоторезистора из объемного монокристалла КРТ и фотодиодов фирмы Sufra-dug и ИФП СОРАН показаны на рис. 5. В предположении, что все фотоприемники имеют обнаружительную способность, ограниченную шумами фонового излучения, фотоприемники с более широкой в длинноволновом интервале спектра характеристикой имеют преимущества в тепловидении за счет большей информативности. В этом смысле фоторезисторы из ГЭС КРТ

МЛЭ превосходят фоторезисторы из ОМ КРТ и существенно превосходит фотодиоды.

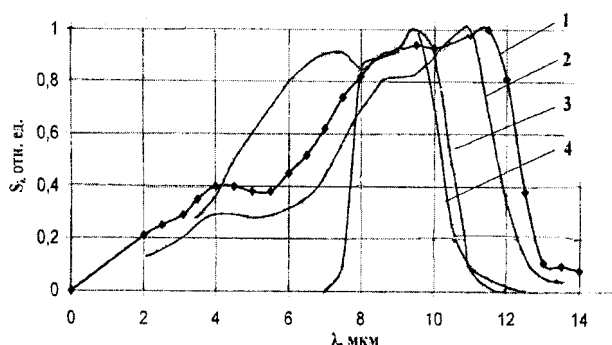


Рис. 5. Спектральные характеристики фотоприемников из материала КРТ диапазона 8–14 мкм:

- 1 — фоторезистор из ГЭС КРТ МЛЭ ФГУП "Альфа";
2 — фоторезистор из ОМ КРТ ФГУП "Альфа"; 3 — фотодиод из ГЭС КРТ МЛЭ ИФП СОРАН; 4 — фотодиод из КРТ ЖФЭ фирма Sofradir

Преимущества фоторезисторов из ГЭС КРТ МЛЭ не исчерпываются спектральными характеристиками.

Выводы

1. Высокое качество гетероэпитаксиальных структур КРТ, полученных методом МЛЭ, открывает возможность создания субматричных и матричных фоторезисторов для диапазона 8–14 мкм, обладающих определенными преимуществами перед фотодиодными матрицами.

2. Для формирования субматричных и матричных фоторезисторов с размерами пикселя $A \leq 30 \times 30$ мкм предпочтительнее ГЭС КРТ МЛЭ с временем жизни носителя $\tau_{77} < 2,5 \cdot 10^{-7}$ с и минимальной толщиной рабочего слоя КРТ ($d \leq 4$ мкм).

Высокое сопротивление фоторезисторов из ГЭС КРТ МЛЭ и высокая вольтовая чувствительность позволили состыковать кремниевый мультиплексор с субматричным ФЧЭ-методом гибридной сборки через индиевые столбики.

Литература

1. Kinch M. A., Borrello S. R. // Breazeale and Simmons Infrared Physics. 1977. V. 17. P. 137–145.
2. Kinch M. A., Borrello S. R. // Ibid. P. 127–135

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

Submatrix photoresistors from heteroepitaxial of MCT—0.1 eV structures, received by a method MBE with the multiplexer in a cold zone

E. V. Susov, O. V. Smolin, I. Yu. Lartsev
ALPHA Federal State Unitary Enterprise, Moscow, Russia

Yu. G. Sidorov, V. S. Varavin, N. N. Mikhaylov
Institute of Physics of Semiconductors, Novosibirsk, Russia

It is shown that CdHgTe heteroepitaxial structures, obtained by a molecular-beam epitaxy (MBE) method on a GaAs substrate such as GaAs—CdZnTe—Cd_xHg_{1-x}Te_{x=0.35→0.25}—Cd_xHg_{1-x}Te_{x=0.215→0.285}—Cd_xHg_{1-x}Te_{x=0.85} with a working layer of $d \leq 4$ μm, unclosed opportunities of making the submatrix and matrix photoresistors, whose efficiency on overlapping the 8–14 μm spectral range is higher in 2 times, than for photodiode arrays.

УДК 621.383

Неохлаждаемое фотоприемное устройство для спектрального диапазона 1,8–2,4 мкм

Т. В. Андреева, В. В. Гаврушко, С. Г. Кузюков, Ю. Н. Прошкин,
А. А. Сапожников, А. А. Сапожников, А. М. Чупраков, А. А. Шленский
Новгородский государственный университет, г. Великий Новгород, Россия

Представлены результаты работы по созданию высокоэффективного, работающего без охлаждения ФПУ на основе твердого полупроводникового раствора In_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}.