

Визначена залежність часу надійної експлуатації інтегральних мікросхем радіотехнічних пристроїв від умов їх експлуатації, стану поверхні кремнієвого чипу та впливів зовнішнього середовища.

### **Література**

1. Мікроскопія в нанотехнологіях / Антонюк В. С., Тимчик Г. С., Верцанова О. В. та ін. – К.: НТУУ «КПІ», 2014 – 260 с.
2. Пьезоэлектрические преобразователи. Справочное пособие / Шарапов В. М. [и др.]. Под ред. Шарапова В. М. – Черкассы: ЧГТУ, 2004. – 435 с.
3. Андриенко В. А. Метод и средства повышения надежности запоминающих устройств путем замещения модулей памяти / В. А. Андриенко, В. Г. Рябцев, Т. Ю. Уткина // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 6 (25). – С. 192 – 195.
4. Атомно-силовой микроскоп NT-206: новые возможности / А. А. Суслов [и др.] // БелСЗМ-6: Сборник докладов 6-го Белорусского семинара по сканирующей зондовой микроскопии, 12-15 октября 2004 г. – г. Минск. – 2004. – С. 123 – 130.
5. Общество с дополнительной ответственностью «Микротестмашины»: [Электронный ресурс]. 2006-2013. URL: <http://microtm.com/> (Дата обращения: 21.11.2014)
6. Бондаренко М. А. Изучение механизма образования переходной зоны в поверхностном слое пьезокерамических изделий нанотехники / М. А. Бондаренко, В. С. Антонюк, В. А. Ващенко, Ю. Ю. Бондаренко, П. В. Петлеваный // Наноинженерия. М. Машиностроение. – 2011. – № 6. – С. 25 – 29.
7. Logitech: »: [Электронный ресурс]. 2014 URL: <http://logitech.com/> (Дата обращения: 21.11.2014)
8. Фролов В. А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС. – К.: Выща школа, 1991. – 310 с.

*Надійшла до редакції  
25 вересня 2014 року*

© Андрієнко В. О., Іванченко В. В., Гончаров А. В., Скорина Є. В., Антонюк В. С., 2014

УДК 532.2

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ФОТОПРИЕМНОМУ УСТРОЙСТВУ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

*Молодык А. В., Пономаренко А. А., Балтабаев Н. Н.*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,  
г. Киев, Украина*

*Исследуется возможность выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии структур с квантовыми ямами с двумя активными областями, каждая из которых обладает чувствительностью в заданной области спектра. Проводится детальный анализ технологических процессов, достоинств и недостатков таких методов как МОС-гидридная эпитаксия и молекулярно-лучевая эпитаксия. Проведен анализ приемников, осуществляющих прием слабых сигналов в двух спектральных областях ИК – спектра. Результаты работы могут быть применены в ходе разработки монолитных двухспектральных фотоприемников, которые представляют особый интерес в сфере радиообнаружения и дальнометрии.*

***Ключевые слова:** фотоприемники длинноволнового диапазона, структуры с квантовыми ямами, МОС-гидридная эпитаксия.*

### **Вступление**

Разработка фотоприемника (ФП) для длинноволнового ИК диапазона на основе структур с квантовыми ямами (СКЯ) ведется за рубежом уже свыше 20 лет. За достаточно короткий промежуток времени проделан путь от физическо-

го ефекта до складніших фоточувствительних мікросхем і ІК систем на їх основі [1]. Сьогодні розроблені матричні ФП на спектральний діапазон 8 - 12 мкм формату 640x480 елементів, а тепловізійні камери на їх основі забезпечують температурне розрешення в тисячні частки градуса [2]. Отримання таких вражаючих результатів в багатьох випадках стало можливим завдяки використанню для вирощування багаторішніх структур в системі GaAs/AlGaAs молекулярно-лучової епітаксії (МЛЭ). Завдяки можливості в процесі росту контролювати товщину епітаксціальних плінок з точністю до одного атомного шару. Така можливість послужила стимулом для розробки на основі СКЯ монолітних двухспектральних матриць, т.е. таких, в яких в кожному чутливому елементі містяться дві області, кожна з яких забезпечує чутливість в одній з двох областей спектра, наприклад, 3 - 5 мкм і 8 - 12 мкм [3, 4].

Головною особливістю і одночасно перевагою вибраного напрямку досліджень було використання для вирощування СКЯ не традиційної МЛЭ, а газової епітаксії з металло-органічних сполучень - МОС-гідридної епітаксії (МОСГЭ). Пожаль, основним недоліком МЛЭ на сьогодні є її низька продуктивність і, як наслідок, відносно висока ціна отриманих з її допомогою СКЯ. В той же час з допомогою МОСГЭ можна вирощувати епітаксціальні плівки в декілька моноатомних шарів з високою точністю, забезпечуючи значно вищу продуктивність, ніж з допомогою МЛЭ. Можливість успішного застосування МОСГЭ для вирощування фоточувствительних СКЯ була продемонстрована вже в ранніх роботах [5].

### **Технологічні особливості вирощування СКЯ методом МОСГЭ**

До недавнього часу в публікуваних експериментальних результатах по ФП на основі СКЯ останні, як правило, були вирощені методом МЛЭ. Співпраця з ФП на основі СКЯ, вирощених методом МОСГЭ, показує, що такі ФП мають ряд відмінностей від аналогів з СКЯ, вирощених МЛЭ. До таких відмінностей слід віднести більш суттєву асиметричність вольт-амперної характеристики (ВАХ), наявність значної фоточувствительності ФП при нормальній падінні випромінювання без спеціальних пристроїв введення. Зазначені особливості пов'язані, на наш погляд, з рядом принципових відмінностей МОСГЭ від МЛЭ, а саме:

- 1) ріст СКЯ в МОСГЭ процесі відбувається при більш високих (вище 700 °С) температурах, ніж при МЛЭ (~ 500 °С);
- 2) ріст СКЯ в МОСГЭ відбувається при тисках в десятки торт, тоді як в МЛЭ тиск в рістовій камері звичайно не вище  $10^{-10} - 10^{-11}$  торт;
- 3) в МОСГЭ ріст матеріалу відбувається в суттєво не рівноважних умовах - в ході протікання хімічної реакції, тоді як в МЛЭ по суті відбувається напылення компонентів твердого розчину на підложку.

Сумарність зазначених факторів може призводити до того, що СКЯ, вирощені методом МОСГЭ, будуть мати не різкі по складу межі бар'єра, а профіль легування ями не буде локалізований в межах ями. Результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень СКЯ,

выращенных методом МОСГЭ, показали, что отклонения формы ям в них от прямоугольной могут приводить к существенной деградации фотоэлектрических характеристик ФП на основе таких СКЯ. В частности, темновые токи в ФП при одних и тех же напряжениях становятся тем выше, чем более пологими являются стенки ям. Это в свою очередь приводит к повышению шумов, снижению обнаружительной способности и температуры выхода на режим ограничения пороговой чувствительности фоновой облученностью (BLIP-режим) [6].

Понимание степени влияния формы границ ям в СКЯ на характеристики ФП привело нас к необходимости провести усовершенствование конструкции

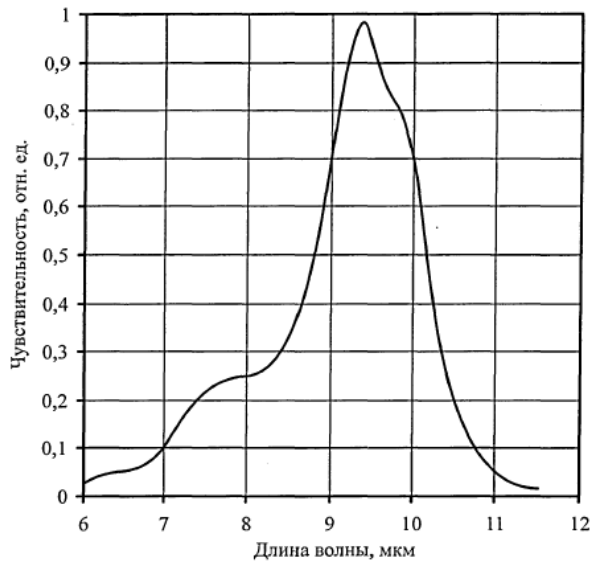


Рис. 1. Спектр фоточувствительности ФС СКЯ ( $T = 78 \text{ K}$ ,  $U = 3 \text{ В}$ )

эпитаксиальных установок и разработку технологических режимов, обеспечивающих более точное управление формой ямы. В результате проведенных усовершенствований были получены образцы ФП на основе СКЯ, сравнимые по своим характеристикам с аналогами на основе узкозонных материалов.

### Фотоэлектрические характеристики СКЯ, выращенных методом МОСГЭ

*Особенности измерения фотоэлектрических характеристик.*

Ниже приводятся результаты исследования основных фотоэлектрических характеристик СКЯ для

спектральных диапазонов 3-5 и 8-12 мкм. Исследованные структуры выращивались методом МОСГЭ при давлении 65 мм рт.ст. и при температурах  $(700 - 800)^\circ \text{C}$  на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100) и содержали до 50 периодов гетероструктур барьер-яма в образцах на диапазон 8-12 мкм, и до 30 периодов в образцах на диапазон 3-5 мкм. Из выращенных структур с использованием химического травления изготавливались экспериментальные образцы фотосопротивлений (ФС) в виде мезы размером  $400 \times 400 \text{ мкм}$ . Специальные устройства ввода излучения в ФС, типа дифракционной решетки, отсутствовали. Омические контакты формировались посредством напыления через маску из фоторезиста сплава Au:Ge, взрыва напыленного слоя и последующего его вжигания. Полученные таким образом контакты покрывались пленками Ti и Al.

В структурах данного типа яма из GaAs имела толщину  $50 \text{ \AA}$ , а барьер  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x=0,24$ ) – 450 Å. Ямы легировались кремнием до концентраций  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Верхний и нижний контактные слои имели толщину 0,7 и 1 мкм соответственно и легировались до концентрации свыше  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

При исследованиях экспериментальных образцов ФС измерялись их ВАХ при различных температурах, спектры фоточувствительности и определялись зависимости абсолютной чувствительности в максимуме спектра от напряже-

ния, зависимости шумового тока от напряжения. На основе полученных результатов рассчитывались зависимости коэффициента фотоэлектрического усиления и обнаружительной способности ФС от напряжения и температуры.

Спектры fotocувствительности измерялись на специализированном стенде на основе монохроматора МДР-41. Измерения абсолютной fotocувствительности ФС производилось с помощью источника модулированного излучения, в котором излучателем являлся макет абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой 573 К. Излучение модулировалось с частотой 1200 Гц.

На рис. 1 представлен спектр fotocувствительности ФС. Форма спектра и положение его максимума не испытывают существенных изменений с изменением температуры в интервале 60 - 77 К или напряжения на образце в интервале 1-4 В. На рис. 2 представлены зависимости абсолютной чувствительности одного из образцов ФС в максимуме спектра от напряжения смещения при обеих его полярностях и различных температурах. Указанные зависимости получены с учетом коэффициента использования излучения от АЧТ, который рассчитывался посредством численного интегрирования спектра fotocувствительности (см. рис. 1).

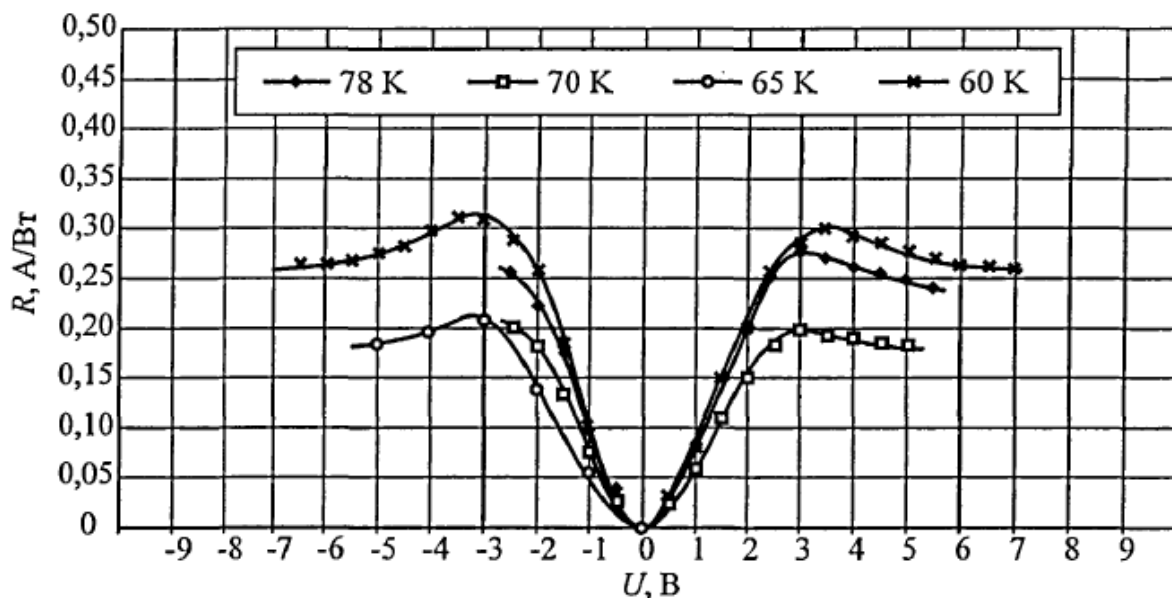


Рис. 2. Зависимость чувствительности от напряжения при различных температурах

Помимо асимметрии этих зависимостей обращает на себя внимание абсолютное значение чувствительности, достигающее долей А/Вт. Столь значительная величина чувствительности получена на образцах ФС без специальных устройств ввода излучения при нормальном его падении по отношению к фронтальной поверхности ФС. Были также измерены зависимости шумового тока от напряжения. На основе полученных зависимостей по известной формуле:  $I_{ш} = (4eI_T g \Delta f)^{1/2}$ , (где  $e$  — заряд электрона;  $I_T$  — темновой ток;  $g$  — коэффициент фотоэлектрического усиления;  $\Delta f$  — полоса частот, в которой регистрируется шум) определялись зависимости коэффициента фотоэлектрического усиления ФС от напряжения. Значение  $g$  находится в пределах 0,5 - 0,6, при напря-

женнях смещения 2 - 5 В, что является типичным для ФС, полученных из структур, выращенных МЛЭ, и говорит о неплохом качестве барьеров в исследуемых образцах.

На рис. 3 представлены зависимости обнаружительной способности ФС -  $D_{\lambda_{\max}}$ , от напряжения при различных температурах. Величина  $D_{\lambda_{\max}}$  рассчитывалась на основе результатов измерения абсолютной чувствительности и шумового тока. Из полученных результатов весьма неожиданным оказалось наличие большой чувствительности ФС при нормальном падении излучения в отсутствие специальных устройств ввода. Ее величина, как известно, зависит от двух факторов:  $g$  и  $\eta$  - квантовой эффективности. Значения  $g$ , как отмечалось выше, не являются аномально большими.

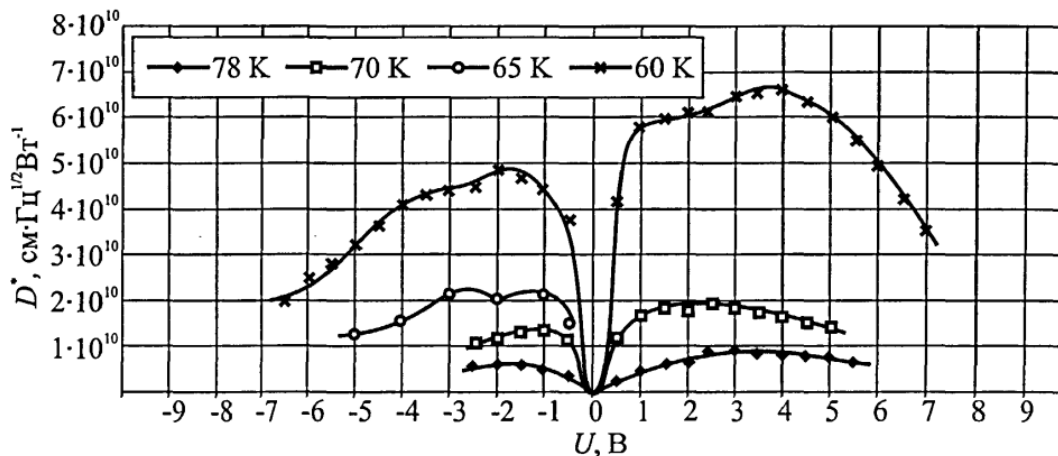


Рис. 3. Зависимость обнаружительной способности от напряжения при различных температурах

Оценка  $\eta$  из формулы для чувствительности ФС:  $R_{\lambda_{\max}} = (e/h\nu)\eta g$  дает величину  $\eta$  свыше 8%. В обычных ФС на основе СКЯ, выращенных МЛЭ, при нормальном падении излучения величина  $\eta$  существенно меньше. Наличие значительной квантовой эффективности отражается и на значениях обнаружительной способности, которые также оказались относительно большими по сравнению с типичными значениями для СКЯ без устройств ввода излучения (см. рис. 3). Заметное повышение квантовой эффективности ФС на основе СКЯ, выращенных МЛЭ, при нормальном падении излучения достигалось в случаях, когда СКЯ выращивались на подложках с ориентацией, при которой тензор эффективной массы имеет недиагональные члены, т.е. когда импульс электрона, взаимодействующего с электрическим полем электромагнитной волны, направленным вдоль плоскости ямы, имеет составляющую, перпендикулярную слоям СКЯ [7]. Наличие заметной фоточувствительности в СКЯ при нормальном падении излучения можно было бы объяснить действием боковой поверхности мезы ФС как своеобразной призмы, выполняющей функцию устройства ввода. Однако оценки, сделанные на основе сопоставления площадей боковой и фронтальной поверхностей мезы, показывают, что для реализации полученной чувствительности в несколько десятых долей А/Вт СКЯ должна обладать временем жизни неравновесных носителей свыше  $10^8$ с либо квантовой эффективностью свыше 100%. Оценки, сделанные на основе экспериментальных результатов, не

подтвердили ни одно из указанных предположений. Добавим также, что обратная сторона подложек ФС, которая при плохой обработке могла бы рассеивать сигнальное излучение и служить устройством ввода, в нашем случае была полированной.

Для объяснения полученного результата обратим внимание на следующее обстоятельство. Слабое поглощение излучения при его нормальном падении наблюдается, как правило, в СКЯ, выращенных методом МЛЭ. Такие СКЯ в наибольшей степени соответствуют модели прямоугольных и симметричных ям, положенной в основу теории, объясняющей это явление. Однако для не прямоугольных асимметричных ям такая теория не разработана.

Между тем, как показано в работе [8], отклонения формы ям от симметричной могут существенно влиять на поляризационную зависимость поглощения излучения в СКЯ. В случае СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, возможно существенное отклонение формы реальных ям от классической модели. Возникновение асимметрии в резкости границ яма-барьер может быть связано с особенностями процесса МОСГЭ. В МОСГЭ газовые реагенты имеют более высокое давление. В этом случае они имеют более высокую вязкость, что может приводить к более продолжительным переходным процессам при переключении газовых потоков и, как следствие, к более существенным, чем в случае МЛЭ, отклонениям формы ямы от прямоугольной и симметричной. Кроме того, как отмечалось выше, процессы МОСГЭ проходят при температурах свыше  $700^{\circ}\text{C}$ . При этих температурах диффузия кремния, которым обычно легируют ямы, становится весьма существенной [9], т.е., независимо от начального положения области легирования, по окончании процесса роста профиль распределения примеси не будет локализован в пределах ямы. Иначе говоря, во всех исследованных структурах, независимо от места введения примеси, она будет присутствовать и в ямах и в барьерах. Это приведет к тому, что при охлаждении до криогенных температур примесь в барьерах будет ионизована, поскольку электроны перейдут на уровни в ямах, и на границе ям и барьеров возникнет встроенное поле. Приближенные оценки показывают, что величина поля может достигать  $10^5\text{ В/см}$ . Такое поле могло бы вызывать деформацию изначально прямоугольной и симметричной ямы и, как следствие, приводить к появлению заметного поглощения излучения при нормальном падении. О возможности такого влияния электрического поля на механизмы поглощения излучения в СКЯ указывалось также в работе [10].

Обсуждаемый эффект будет существенно слабее выражен в СКЯ, полученных МЛЭ, поскольку практически всегда в них легируют середину ямы, и при температурах роста  $\sim 500\text{ C}$  примесь не успевает продиффундировать в барьеры.

Выводы, сделанные на основе проведенного выше анализа причин появления аномально высокой чувствительности, а также других особенностей ФС на основе СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, имеют в основном характер предположений. Поэтому, для установления истинных причин описанных явлений требуются дальнейшие исследования.

### **СКЯ на спектральный диапазон 3 - 5 мкм**

Исследование СКЯ на спектральный диапазон 3-5 мкм были начаты сравни-

тельно недавно. Тем не менше, благодаря опыту при работе с СКЯ для длинноволнового диапазона, удалось в относительно короткие сроки получить обнадеживающие результаты.

СКЯ для данного диапазона выращивались двух типов: n-типа и p-типа. В СКЯ n-типа ямы имели состав  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,22$ ), барьер имел состав  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,35$ ).

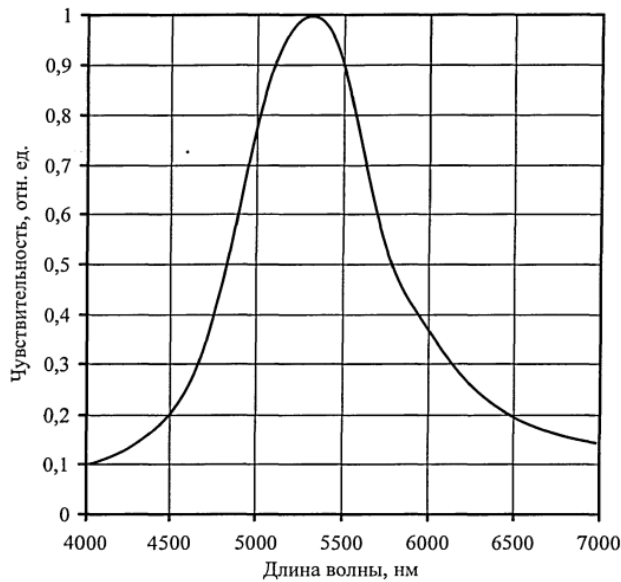


Рис. 4. Спектр фоточувствительности ФС n-типа

Ямы легировались кремнием до концентраций  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . В СКЯ p-типа яма была из GaAs и легировалась углеродом до концентраций  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а барьер имел состав  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0,55$ ). Экспериментальные образцы ФС из СКЯ обоих типов изготавливаются, как описано выше. На рис. 4 представлен спектр фоточувствительности ФС n-типа, измеренный при 77 К. На рис. 5 представлены ВАХ образца ФС n-типа, также измеренные при температуре 77 К. Наличие тока в отсутствие смещения при отрицательной полярности говорит о возможной асимметрии формы барьеров. На рис. 6 представлены зависимости абсолютной чувствительности ФС в

максимуме спектра от напряжения смещения. Относительно малое значение чувствительности данного образца по сравнению с аналогом на диапазон 8-12 мкм связано по всей видимости с двумя причинами.

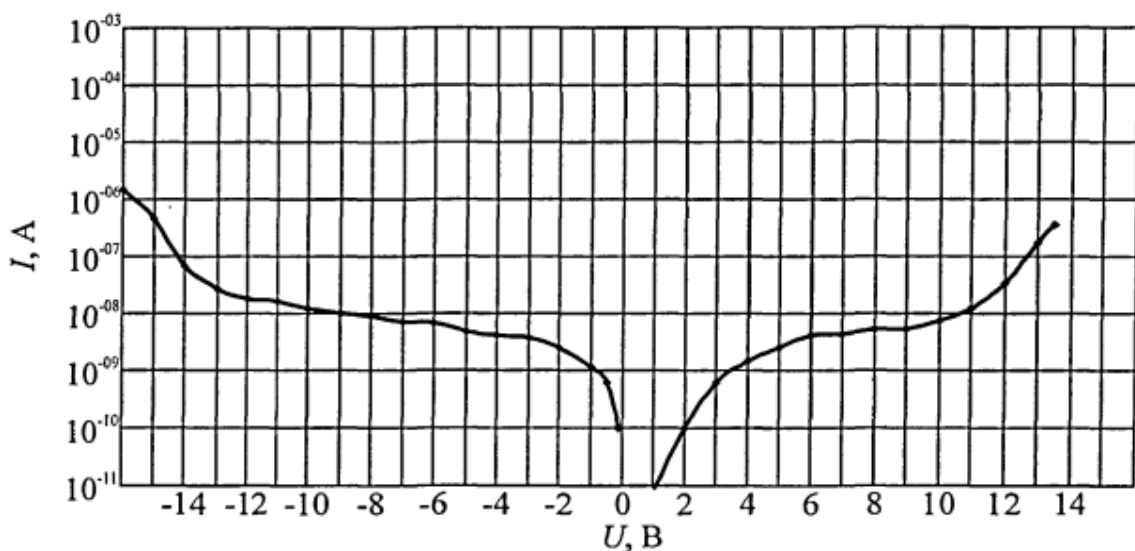


Рис. 5. ВАХ образца ФС n-типа при 77 К

Во-первых, в данной СКЯ всего 30 периодов барьер-яма, т.е. при прочих равных условиях квантовая эффективность в такой СКЯ будет почти в два раза меньше. Во-вторых, как отмечалось в работе [8], в коротковолновых СКЯ поглощение излучения при нормальном падении будет меньше, чем в длинноволновых аналогах. Заметим, что в ФС с устройством ввода в виде дифракционной решетки и удаленной подложкой чувствительность может быть увеличена в несколько раз.

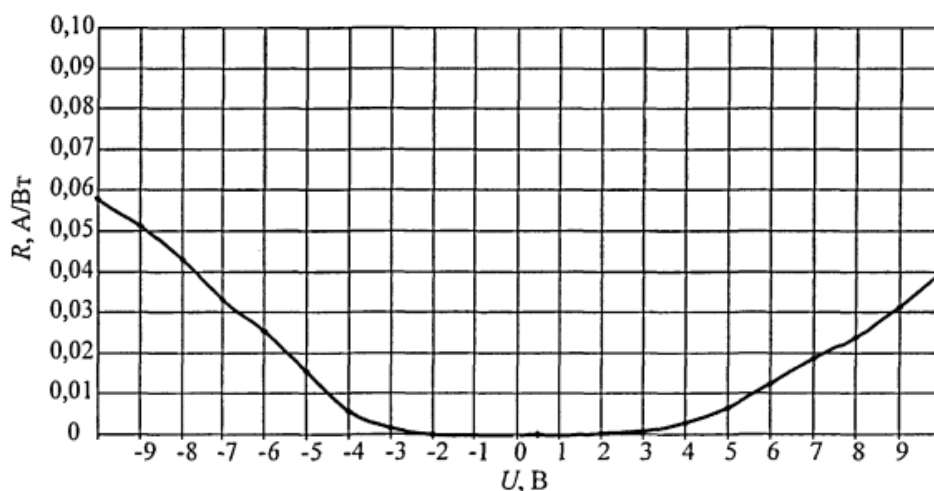


Рис. 6. Зависимость абсолютной чувствительности ФС в максимуме спектра от напряжения смещения

На рис. 7 предоставлены зависимости обнаружительной способности ФС в максимуме спектра чувствительности от напряжения. Ее значения заметно ниже чем у ФП на основе узкозонных материалов, например InSb.

Однако в конструкции ФС с устройством ввода и удаленной подложкой ее величина также может быть повышена в несколько раз (рис. 8).

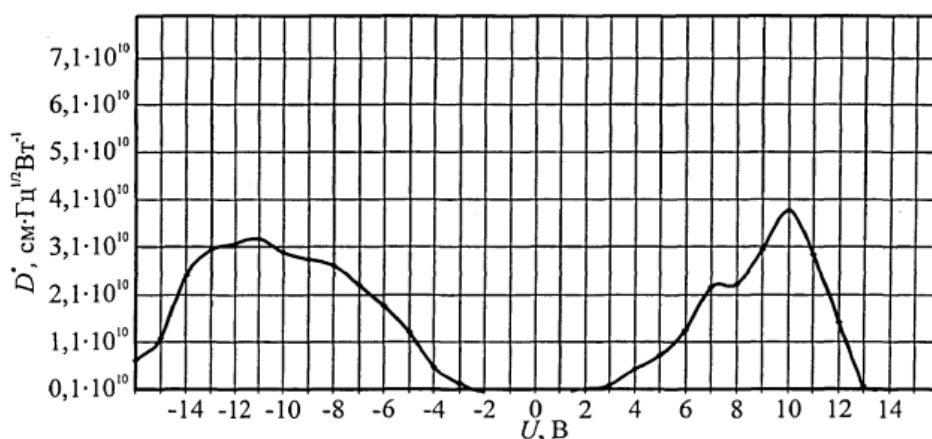


Рис. 7. Обнаружительная способность ФС n-типа при 77 К

### Выводы

В заключении отметим, что СКЯ для обоих диапазонов являются технологически совместимыми, т.е. выращивание СКЯ обоих типов методом МОСГЭ про-



исходит в достаточно сходных режимах, технология формирования чувствительных элементов для них также одинакова.

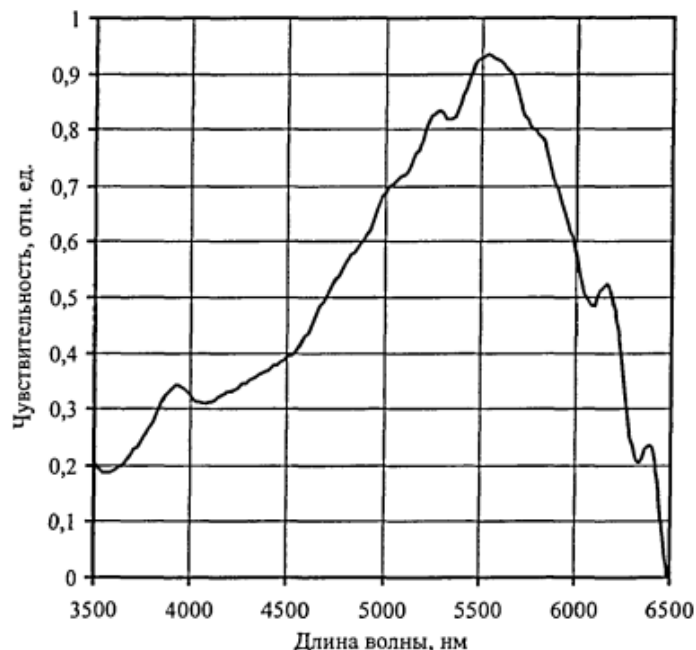


Рис. 8. Спектр фоточувствительности образца ФС р-типа

Таким образом, существует вполне реальная возможность для выращивания методом МОСГЭ СКЯ с двумя активными областями, каждая из которых обладает чувствительностью в заданной области спектра, например 3-5 и 8-12 мкм. На основе таких СКЯ могут быть изготовлены монолитные двухспектральные ФП, которые представляют особый интерес при разработке специальных опико-электронных приборов, в первую очередь высокоточных и чувствительных комплексов слежения, обнаружения огневых точек противника и боевой техники, радиолокационных станций.

#### Литература

1. Завадский Ю.И., Кузнецов Ю.А., Чернокожий В.В., Белоконев В.М., Дегтярев Е.В. Факторы, ограничивающие пороговые характеристики матричных фотоприемников длинноволнового инфракрасного диапазона // Тез. докл. Совещ. «Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники. Фотоника-2003».- Новосибирск. - 2003. - С. 40.
2. S.D.Gunapala, V.Bandara, J.K.Liu, et.al., IEEE Trans. El. Dev., v.45, N9, pp. 1890-1895.
3. M.Z.Tidrow, J.C.Ciang, S.S.Li, K.Bacher, Proc SPIE, V3061, pp. 772-780, 1997.
4. M.Sundaram, S.C.Wang, Proc.SPIE, V.4028, pp. 311-316, 2000.
5. I.D.Zalevsky, V.B.Kulikov,G.H.Avetisyan et.al., Proc SPIE,V.2397, pp.733-744,1995.
6. В.Б.Куликов, И.В.Будкин, Тезисы докладов XVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, май 2002г., г.Москва.
7. Y.Zhang,N.Baruh,W.I.Wang, Electr.Lett.,v.29,N2,pp213-214. (1993)
8. W.E.Hagston, T.Stimer, F.Rasul, J.Appl.Phys.,v.89,N2,pp 1087-1100, (2001).
9. D.G.Deppe,N.Holonyak,J.Appl.Phys.,v.64,N12,R93-R113 (1988).
10. А.Я.Шик.,ФТП ,Т.20, в.9, сс 1598-1603 (1986).

Надійшла до редакції  
20 квітня 2014 року

© Молодык А. В., Пономаренко А. А., Балтабаев Н. Н., 2014