

ляет сохранить до 16 кадров изображения. Для передачи сохраненных кадров в ЭВМ в состав процессора включен модуль, реализующий передачу данных через интерфейс LPT.

Возможен вывод как стандартного черно-белого изображения, так и полутонового изображения в режиме цветового кодирования в формате стандарта PAL. Предусмотрена возможность вывода изображения на любой тип дисплея.

Наряду со специфическими алгоритмами обработки изображения пировидикона, такими, например, как межкадровое вычитание, устранение дефектов пироэлектрической мишени и т. д., процессор позволяет производить в реальном масштабе времени большинство универсальных алгоритмов на основе свертки с окнами 3×1 , 5×1 , 7×1 и 3×3 .

Завершена разработка второго варианта процессора, выполненного на базе более мощной серии ПЛИС типа Cyclone производства фирмы Altera. Этот процессор ориентирован на выполнение более сложных алгоритмов обработки изображений, в частности, спектрального Фурье-анализа

входного сигнала, его частотной коррекции и восстановления изображения в реальном масштабе времени. Процессор ориентирован на реализацию фильтров с конечной импульсной характеристикой. Кроме того, в процессоре предусмотрены одновременный ввод двух разнотипных изображений (тепловизионного и телевизионного) по двум независимым каналам, их одновременная обработка, масштабирование и вывод с последующим совмещением изображений.

В обоих вариантах процессора предусмотрена возможность подключения дополнительных модулей, таких как модуль интерфейса USB, модуль подключения Compact Flash и MMC карт.

Л и т е р а т у р а

1. Грушевицкий Р. И., Мурсаев А. Х., Угрюмов Е. П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. — СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
2. TMS320C64x™ DSP Benchmarks. Texas Instrument Inc., 2000.
3. High performance 64, 256, 1024-point complex FFT: IFFT LogiCore User Guide V1.0. Xilinx Inc., 2002.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

The system for thermal image digital processing

V. N. Bodrov, P. S. Kondratov

Moscow Power Engineering Institute. Department of Electronic Devices, Moscow, Russia

G. A. Padalko

AOMZ, Azov, Rostovskaya obl., Russia

The built-in system for thermal image processing in the real time, was constructed on the base of FPGA. The basic purpose of the system — increasing the signal/noise ratio of the thermal images. Contains fast 12 bit ADC, the 1 Mb RAM, replaceable module for connection to PC. Algorithms with use of convolution with various windows are realized. The opportunity of realization FFT for the thermal images is shown. The opportunity of colour coding of thermal images and connections various modules for data transfer and data storage is stipulated.

УДК 548.25: 621.383.4

Структурные и электрофизические свойства гетероэпитаксиальных пленок HgCdTe, выращенных методом МЛЭ на подложках Si (310)

М. В. Якушев, А. А. Бабенко, В. С. Варавин, В. В. Васильев, Л. В. Миронова,
Д. Н. Придачин, В. Г. Ремесник, И. В. Сабина, Ю. Г. Сидоров, А. О. Сусяков
Институт физики полупроводников, г. Новосибирск, Россия

Методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках Si (310) выращены слои Hg_{1-x}Cd_xTe с составом $x = 0,3—0,34$. В выращенных структурах методом Холла измерены концентрация и подвижность носителей, методом селективного травления определена

плотность дефектов упаковки, прорастающих дислокаций и антифазных границ, определена плотность макроскопических V-дефектов. Изготовлена матрица фотодиодов размером 128×128 с длинноволновой границей fotocувствительности $\lambda_{1/2}(77\text{ K}) = 4,07\text{ мкм}$ с высокими фотоэлектрическими характеристиками.

Несмотря на разработки инфракрасных фотоприемников (ИК ФП) на альтернативных материалах, твердые растворы кадмий—ртуть—теллур $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (сокращенно КРТ) благодаря своим уникальным физическим свойствам остаются базовым материалом для ИК ФП с предельными обнаружительными способностями. Развитие ИК ФП идет по пути увеличения числа чувствительных элементов и усложнения архитектуры в направлении использования многослойных структур с различным типом легирования. В результате удается повысить рабочую температуру, создать многоцветные фотоприемники [1] и улучшить чувствительность. Все это повышает роль метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в производстве КРТ. МЛЭ позволяет получать однородные по фотоэлектрическим параметрам и составу слои КРТ на подложках диаметром до 6 дюймов. Благодаря низкой температуре выращивания МЛЭ обеспечивает приготовление структур на основе КРТ с наибольшей резкостью гетерограниц по сравнению с другими методами. За счет низкой температуры обеспечивается также низкая концентрация электрически активных дефектов — уровень достигаемой концентрации носителей заряда составляет 10^{14} см^{-3} при высокой подвижности носителей и продолжительном времени жизни неосновных носителей. Качество КРТ, производимого методом МЛЭ, чрезвычайно сильно повысилось за последние десять лет и на его основе были созданы ИК ФП разнообразных форматов, работающие в режиме ограничения фоновым излучением [2]. Из всех методов выращивания КРТ МЛЭ обладает наибольшими возможностями контролируемого выращивания эпитаксиальных слоев КРТ на иностранных ("альтернативных") подложках.

Для интеграции со считывающей схемой в детекторах на основе КРТ особый интерес представляют fotocувствительные слои, выращенные на подложках из кремния. Кроме высокой устойчивости при термоциклировании приборы на основе КРТ, выращенном на кремнии, отличаются дешевизна производства и большой размер пластин по сравнению с КРТ, выращенном на согласованных подложках из CdZnTe .

При гетероэпитаксии КРТ на кремнии возникают проблемы, связанные с большим рассогласованием параметров решеток, неизовалентностью и моноатомностью кремния, которые приводят к появлению большого количества дефектов, что в свою очередь ведет к деградации электрофизиче-

ских свойств гетероструктур и параметров приборов, изготовленных на основе выращиваемых пленок.

Технологические процедуры получения и исследования образцов

Рост гетероэпитаксиальных структур HgCdTe/Si (310) осуществлялся на многокамерной сверхвысоковакуумной установке молекулярно-лучевой эпитаксии "Обь". Установка включала камеры загрузки-выгрузки, предэпитаксиального отжига, роста буферных слоев и роста КРТ. В качестве *in situ* методов контроля процессов предэпитаксиальной подготовки и роста использовали дифракцию быстрых электронов (ДБЭ) и одноволновую эллипсометрию (длина волны $\lambda = 632,8\text{ нм}$). В качестве подложек использовали заводские кремниевые пластины КДБ 10 ТУ 240 диаметром 76 мм, ориентированные по плоскости (310).

Химическая подготовка подложек состояла из следующих этапов: погружение в горячий ($100\text{ }^\circ\text{C}$) раствор $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2$ в соотношении 1 : 1 на 10 мин; полирующее травление в растворе плавиковой, уксусной и азотной кислот в соотношении 1 : 1 : 40 в течение 6 мин. На последнем этапе химической обработки поверхность пассивировалась — закрывалась монослойным покрытием водорода путем помещения в 2%-ный раствор HF (гидрогенизировалась). Все операции разделялись промывкой в деионизованной воде с сопротивлением 18 МОм×см. Далее образцы загружали в вакуумную систему в ламинарном боксе.

Предэпитаксиальный отжиг в вакууме проводили в два этапа. На первом этапе образец выдерживали при температуре $150\text{—}180\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч для удаления физически адсорбированных загрязнений, которые могли попасть на образец и носитель при операциях загрузки. Затем образец нагревали до температуры $550\text{—}600\text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью $\sim 30\text{ град/мин}$ в потоке мышьяка (As_4) с эквивалентным давлением порядка $10^{-6}\text{ мм рт. ст.}$ После экспозиции в течение 15 мин в потоке мышьяка при заданной температуре образец охлаждали до температуры $100\text{ }^\circ\text{C}$ и передавали в камеру роста буферных слоев.

Рост буферного слоя проводили также в два этапа. На первом этапе со скоростью $20\text{—}50\text{ \AA/мин}$ выращивали слой ZnTe (310) толщиной 100 \AA . Температура роста теллурида цинка составляла $200\text{—}240\text{ }^\circ\text{C}$, плотность потока атомов Zn была в $20\text{—}40$ раз больше плотности потока ато-

мов Te_2 . На втором этапе со скоростью 2—2,5 мкм/ч выращивали слой CdTe (310) толщиной 6—8 мкм. Температура роста теллурида кадмия составляла 280—320 °С, плотность потока атомов Cd в 3—5 раз превышала плотность потока атомов Te_2 .

На полученных таким образом буферных слоях выращивались слои HgCdTe по стандартной технологии, разработанной для роста гетероэпитаксиальных структур $\text{HgCdTe}/\text{GaAs}$ (310) [3].

Плотность поверхностных макродефектов измеряли с помощью оптического микроскопа со встроенной ССD-камерой, совмещенного с персональным компьютером. Данный программно-аппаратный комплекс позволяет в автоматическом режиме сканировать всю поверхность гетероструктуры и определять латеральное распределение плотности объектов заданного типа и размера на поверхности образца. В выращенных структурах методом Холла измеряли концентрацию и подвижность носителей. После этого поверхность структуры травили в селективном травителе: 5 г CrO_3 + 3 мл HCl + 15 мл H_2O [4]. В результате на поверхности КРТ появлялись ямки травления, имеющие характерную форму, различную для разных типов дефектов.

Результаты и обсуждение

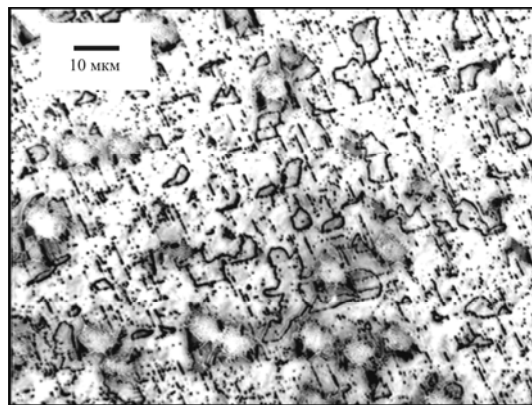
В слоях КРТ, выращенных на подложках из кремния, могут присутствовать три вида дефектов: прорастающие дислокации, дефекты упаковки (ДУ) и антифазные домены. Кроме того, существуют макроскопические V -дефекты, являющиеся сложными образованиями, содержащими области нарушенной структуры, двойниковые ламели и ДУ.

Сопоставление результатов селективного травления с плотностью макроскопических V -дефектов позволило установить корреляцию между плотностью V -дефектов и плотностью антифазных доменов в гетероструктурах HgCdTe/Si (310). На рис. 1 представлены результаты селективного травления гетероструктур HgCdTe/Si (310) с различной плотностью V -дефектов. При селективном травлении точками выявляются прорастающие дислокации, прямыми параллельными линиями — дефекты упаковки, замкнутыми линиями произвольной формы — границы между антифазными доменами. Антифазные домены воспроизводимо выявлялись на образцах с плотностью V -дефектов более $3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ (см. рис. 1, а), в то время как на образцах с плотностью V -дефектов $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ они не наблюдались (см. рис. 1, б).

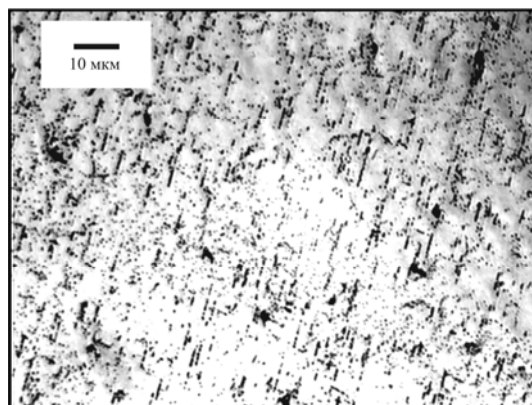
По данным ПЭМ, границы между антифазными доменами представляют собой области нарушен-

ной структур, вблизи которых возможно зарождение V -дефектов [5].

Кроме того, во всех образцах с наличием антифазных границ наблюдаются низкие значения подвижности носителей заряда, таким образом, можно утверждать, что наличие антифазных доменов в пленке губительным образом сказывается на электрофизических свойствах КРТ.



а



б

Рис. 1. Результаты селективного травления образцов HgCdTe/Si (310) в травителе состава $5 \text{ г } \text{CrO}_3 + 3 \text{ мл } \text{HCl} + 15 \text{ мл } \text{H}_2\text{O}$:

а — плотность V -дефектов $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$;

б — плотность V -дефектов $5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$.

Замкнутые линии произвольной формы — антифазные границы; прямые параллельные линии — дефекты упаковки; точки — прорастающие дислокации

Возникновение антифазных доменов в слоях КРТ, выращенных на подложках из Si , обусловлено моноатомностью кремния. Если поверхность кремния содержит ступени моноатомной высоты и осаждение на всех террасах начинается, например, с теллура, то при образовании второго монослоя слой цинка на нижележащих террасах окажется продолжением слоя теллура на вышележащих террасах. Такая ситуация соответствует образованию антифазных границ, наличие которых при дальнейшем росте приведет к появлению антифазных

доменов. Следовательно, для отсутствия антифазных доменов необходимо, чтобы поверхность образца имела ступени двухатомной высоты.

В работе [6] методом сканирующей туннельной микроскопии показано, что поверхность Si (310) не является атомно гладкой, и при любой подготовке не образует плоских граней, а на поверхности присутствует выраженный рельеф. Тем не менее анализ дифракционных картин от такой поверхности свидетельствует о наличии ступеней двухатомной высоты. Таким образом, поверхность Si (310) имеет двойственную структуру: наблюдается выраженный неперриодический рельеф, который в основном образован ступенями двухатомной высоты.

Такая структура поверхности предъявляет очень высокие требования к качеству подготовки поверхности и условиям формирования гетероперехода. В проведенных нами исследованиях были определены следующие факторы, влияющие на образование антифазных границ в гетероструктуре HgCdTe/Si (310).

Во-первых, для повышения доли поверхности, образованной ступенями двухатомной высоты и, соответственно, для снижения вероятности образования антифазных доменов необходимо добиться низкой концентрации остаточных загрязнений на поверхности. Так, при концентрации кислорода и углерода на поверхности более 5 % от монослоя на поверхности Si (310) присутствуют в основном только ступени одноатомной высоты. В нашем случае ситуация осложняется тем, что в качестве предэпитаксиальной подготовки мы использовали HF-spin-etch-процедуру, описанную в работе [7]. В данном методе предэпитаксиальный отжиг проводится при температурах не выше 550 °С, что делает невозможной десорбцию углерода и кислорода с поверхности. Это обстоятельство накладывает очень высокие требования на процедуру предэпитаксиальной подготовки и загрузки подложки в вакуумную систему.

Во-вторых сопоставление результатов селективного травления с условиями роста первого буферного слоя ZnTe позволило сделать следующий вывод. Для предотвращения образования антифазных доменов в начальный момент роста необходимо создавать условия, облегчающие адсорбцию цинка, т. е. понижать температуру подложки и повышать давление паров цинка.

В-третьих даже соблюдение всех вышеперечисленных условий не позволяет полностью подавить образование антифазных доменов в гетеропереходе. Поэтому в процессе роста буферного слоя необходимо создать условия, способствующие самоаннигиляции антифазных доменов. Самоаннигиляция антифазных доменов, образовавшихся

в начальный момент при росте пленки двухкомпонентного полупроводника, возможна. Так, самоаннигиляцию антифазных доменов наблюдали при росте GaAs на Si (001) [8]. В этой работе авторы показали, что если вероятность встраивания атомов одного из компонентов бинарного соединения оказывается выше, то по мере роста слоя размер домена одного типа уменьшается, и в конечном счете пленка окажется однодоменной. Исследования показали, что в выращиваемых нами структурах для самоаннигиляции доменов необходимо создать условия для облегчения адсорбции кадмия на поверхности в процессе роста буферного слоя CdTe, для чего необходимо повышение давления паров Cd.

Оптимизировав условия предэпитаксиальной обработки подложки и режимы роста буферных слоев теллурида цинка и теллурида кадмия, удалось получить гетероструктуры HgCdTe/Si (310), на поверхности которых методом селективного травления антифазные границы не выявлялись (см. рис. 1, б).

Из рис. 1 видно также, что в слоях HgCdTe/Si (310) присутствуют дислокации и дефекты упаковки.

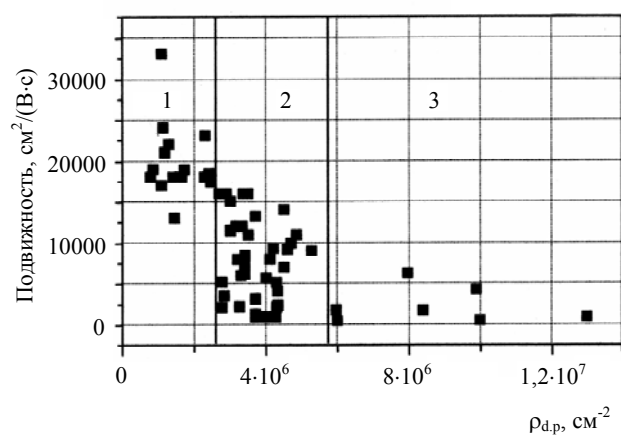
Плотность дислокаций в выращиваемых структурах составляет около 10^7 , что на порядок хуже, чем в аналогичных гетероструктурах, выращенных на GaAs. Высокая плотность дислокаций связана с большим рассогласованием параметров решеток, и в процессе роста буферного слоя удается добиться только минимизации плотности за счет аннигиляции дислокаций.

Проведенные исследования не обнаруживают корреляции между плотностью дефектов упаковки и плотностью *V*-дефектов. В рассматриваемых структурах плотность дефектов упаковки сильно не меняется как по площади образца, так и от образца к образцу и составляет величину порядка 10^6 см⁻². В то же время плотность *V*-дефектов может варьировать от 10^3 до 10^5 см⁻².

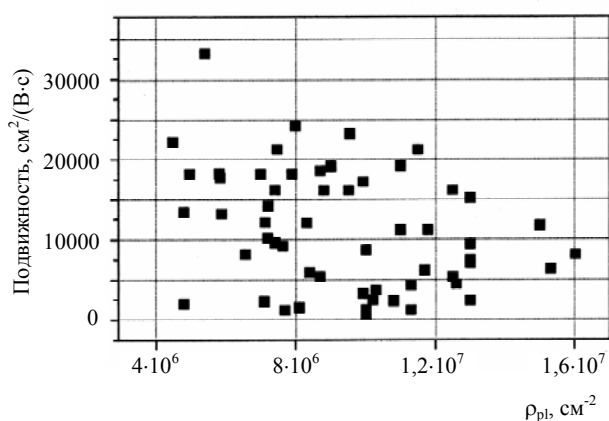
Было установлено влияние плотности дефектов упаковки и дислокаций несоответствия на электрофизические свойства итоговых структур. На рис. 2 приведены соответствующие зависимости. Видно, что электрофизические свойства структур почти не зависят от плотности дислокаций.

По соотношению подвижности носителей и плотности дефектов упаковки (ДУ) можно выделить три области. При плотности ДУ, меньшей, чем $2,5 \cdot 10^6$ см⁻² (см. рис. 2 область 1), удается получить значения подвижности носителей, близкие к максимально возможным расчетным значениям для КРТ, с составом $x = 0,3$ ($40\,000$ см²·В⁻¹·с⁻¹). При значении плотности ДУ в пределах от $2,5 \cdot 10^6$ до $5,5 \cdot 10^6$ см⁻² (см. рис. 2 область 2), подвижность но-

сителей меняется от образца к образцу в широких пределах и может принимать значения как достаточно высокие, так и низкие. Видимо, в этой области плотность ДУ еще недостаточно большая, чтобы ухудшить электрофизические свойства структур, и большое влияние оказывают другие факторы, ограничивающие подвижность носителей. При плотности ДУ, большей, чем $5,5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ (см. рис. 2 область 3), высокие значения подвижности носителей не наблюдаются, и можно сказать, что такая высокая плотность ДУ приводит к деградации электрофизических свойств. В то же время удается получить структуры, в которых, несмотря на присутствие ДУ, подвижность носителей довольно высока и несильно отличается от предельной.



а



б

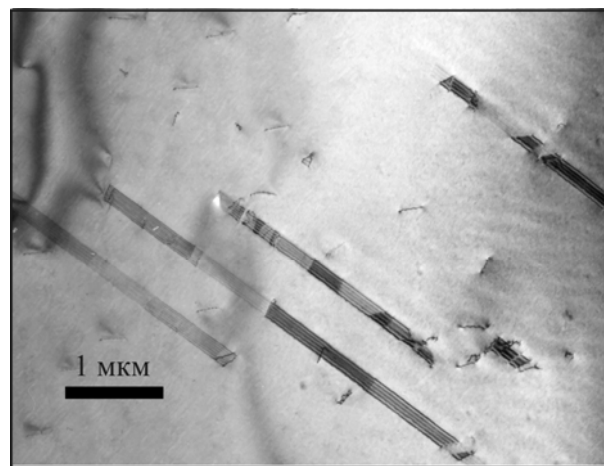
Рис. 2. Зависимость подвижности носителей от плотности дефектов упаковки (а) и дислокаций несоответствия (б)

Принято считать, что наличие дефектов упаковки в гетероэпитаксиальных структурах обусловлено исключительно большим рассогласованием параметров решетки. Однако отсутствие ДУ в слоях КРТ, выращенных на подложках из GaAs,

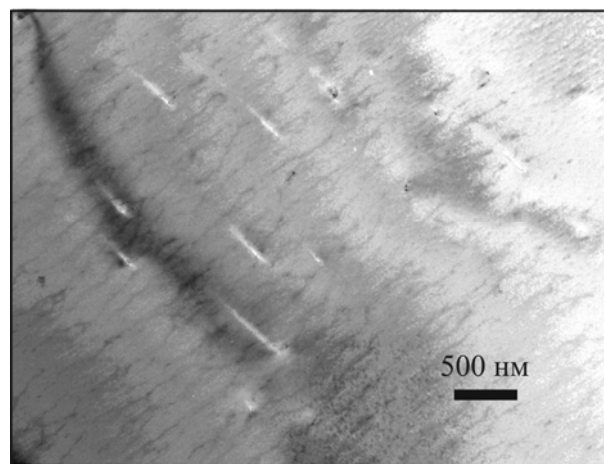
приводит к выводу о том, что существуют другие факторы, влияющие на появление ДУ в гетероструктурах КРТ.

Нам не удалось установить зависимость плотности ДУ от условий выращивания гетероструктуры, и в настоящее время мы не можем влиять на плотность ДУ в процессе роста пленок.

Тем не менее получение гетероэпитаксиальной структуры HgCdTe/Si (310) без ДУ возможно. Нами установлено, что отжиг в инертной атмосфере при температуре 200—250 °С в течение 6—10 ч приводит к аннигиляции дефектов упаковки на всю глубину слоя HgCdTe. В отожженных образцах ДУ не выявляются посредством селективного травления и просвечивающей электронной микроскопией. На рис. 3 представлены ПЭМ-изображения приповерхностной области образца HgCdTe/Si (310) до и после отжига. Видно, что в отожженном образце ДУ отсутствуют.



а



б

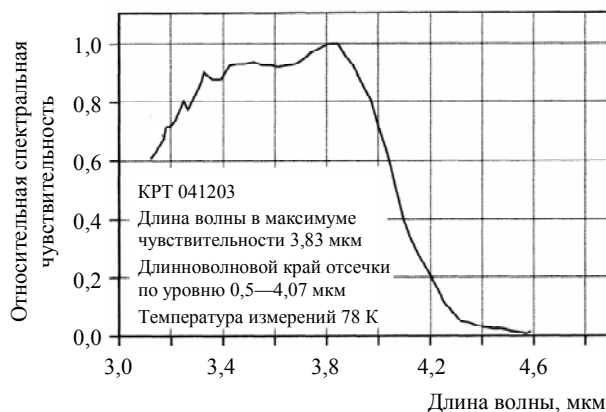
Рис. 3. ПЭМ-изображения приповерхностной области образца HgCdTe/Si (310) до (а) и после (б) отжига

Диоды и матрицы

Проведенные исследования позволили воспроизводимо выращивать однодоменные слои HgCdTe на подложках Si (310) диаметром 76 мм с плотностью V-дефектов 2000—5000 см⁻² и плотностью ДУ порядка 10⁶ см⁻².

Состав эпитаксиальных слоев твердого раствора Cd_xHg_{1-x}Te для матричных фотоприемников выбирался в диапазоне $x = 0,3 - 0,34$. Стандартное отклонение состава $\Delta x = 0,005$, относительное отклонение состава $\Delta x/x = \pm 0,776 \%$. Пленки HgCdTe/Si (310) имеют после роста *n*-тип проводимости и следующие электрофизические параметры (при 77 К): концентрация электронов $(5-10) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, подвижность $(1,5-2,5) \cdot 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ и время жизни неосновных носителей $\tau_{300} = 1-3 \text{ мкс}$, $\tau_{77} = 5-15 \text{ мкс}$. Невысокие значения подвижности в пленках HgCdTe/Si (310) определяются присутствием в слоях ДУ. Отжиг пленки в инертной атмосфере при 215 °С снижает плотность ДУ на несколько порядков и переводит гетероструктуры в *p*-тип со следующими параметрами: концентрация дырок $(5-15) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, подвижность 200—400 см²·В⁻¹·с⁻¹, время жизни неосновных носителей в пленках *p*-типа с $x = 0,3-0,34$ составляет $\tau_{77} = 35-50 \text{ нс}$.

Из структур *p*-типа с помощью ионной имплантации была изготовлена матрица фотодиодов с размерностью 128×128 с длинноволновой границей фоточувствительности $\lambda_{1/2} (77 \text{ К}) = 4,07 \text{ мкм}$. Тепловое изображение, полученное с помощью макета тепловизионного канала на основе ФПУ формата 128×128, визуально наблюдается в реальном масштабе времени. На изображении видно характерное распределение температуры на лице человека, на верхней одежде наблюдается след от прикосновения руки. На рис. 4 приведены относительная спектральная чувствительность элементов ФПУ и тепловое изображение человека. Для 128 диодов, расположенных по диагонали матричного фотодетектора, средние значения темного тока, суммарного тока при засветке и фототока составляли 8,66; 48,57; 39,9 пА, соответственно. Среднеквадратичные отклонения для данных параметров составляли 3,91; 10,14; 9,56 пА. Среднее значение R₀A для данных диодов составляет $5,37 \cdot 10^3 \text{ Ом}$.



а



б

Рис. 4. Относительная спектральная чувствительность элементов ФПУ (а) и пример теплового изображения (б), полученного с помощью ФПУ, размерностью 128×128 элементов, изготовленного на основе HgCdTe/Si (310), в составе макета тепловизионного канала

Основные фотоэлектрические характеристики матричного фотоприемного модуля форматом 128×128 элементов приведены ниже.

На рис. 5 представлены гистограммы чувствительности и пороговой облученности, характеризующие однородность элементов фотоприемного устройства. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что нелегированные образцы КРТ дырочного типа проводимости, выращенные на подложках из кремния, соответствуют требованиям, предъявляемым к фоточувствительным слоям при их использовании в многоэлементных и матричных ФПУ, и обеспечивают высокие фотоэлектрические параметры.

Характеристики матричного фотоприемного модуля

Рабочая температура, К	78
Длина волны максимума спектральной чувствительности λ_m , мкм	3,83
Среднеквадратичное отклонение вольт-ваттной чувствительности от среднего значения, %	±15,4
Средняя пороговая облученность в максимуме чувствительности <i>P</i> с холодной диафрагмой, Вт/см ²	$4,5 \cdot 10^{-8}$
Количество дефектных (не удовлетворяющих требованиям для вольт-ваттной чувствительности и	3,1

$P > 9 \cdot 10^{-8}$) элементов, %

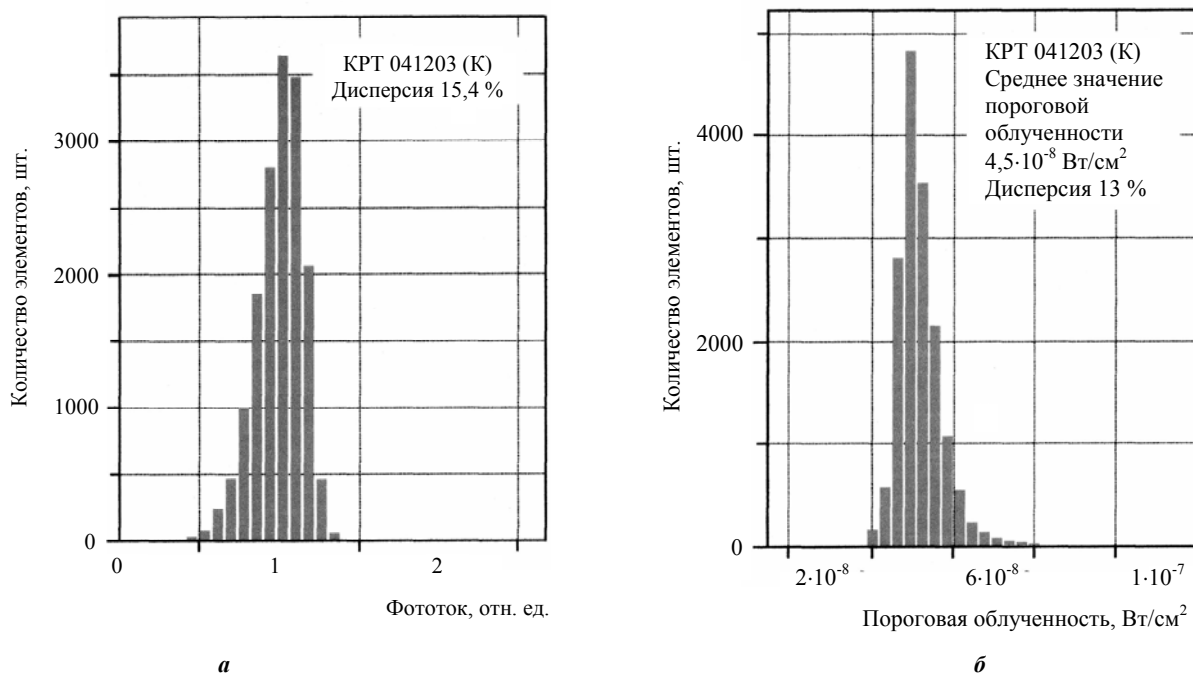


Рис. 5. Гистограммы фоточувствительности ФПУ (а) и пороговой облученности ФПУ (б) размерностью 128×128 элементов, изготовленного на основе HgCdTe/Si (310)

Заключение

Получены однодоменные слои HgCdTe на подложках Si (310) диаметром 76 мм с плотностью V -дефектов $2000\text{--}5000\text{ см}^{-2}$ и плотностью ДУ порядка 10^6 см^{-2} .

Установлено, что отжиг в инертной атмосфере при температуре $200\text{--}250\text{ °C}$ в течение $6\text{--}10$ ч приводит к аннигиляции ДУ на всю глубину слоя HgCdTe.

Разработана технология, позволяющая создавать методом МЛЭ на подложках из кремния диаметром 76 мм нелегированные образцы КРТ дырочного типа проводимости.

На примере матричного фотоприемного модуля размерностью 128×128 с длинноволновой границей фоточувствительности $\lambda_{1/2}(77\text{ К}) = 4,07\text{ мкм}$ продемонстрирована возможность применения эпитаксиальных слоев КРТ, выращенных методом МЛЭ на кремниевых подложках, для создания надежных, стойких к термоциклированиям многоэлементных фотоприемных модулей для спектрального диапазона $3\text{--}5\text{ мкм}$.

Работа выполнена при частичной поддержке интеграционного проекта СО РАН № 3.20.

Литература

1. Goldberg A. Dual-Band infrared imaging of tactical and strategic targets_EO/IR technology branch army research laboratory. — Adelphi, MD 20783.
2. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003.
3. Сидоров Ю. Г., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Михайлов Н. Н., Якушев М. В., Сабина И. В. Молекулярно-лучевая эпитаксия твердых растворов кадмий—ртуть—теллур на "альтернативных" подложках// ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 9. С. 1092.
4. Mackett P. Properties of narrow gap Cadmium-based compounds, EMIS. Data review Series № 10/Ed. Peter Capper, 1994. P. 188.
5. Сабина И. В., Гутаковский А. К., Сидоров Ю. Г., Якушев М. В., Варавин В. С., Латышев А. В.// Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82. Вып. 5—6. С. 326.
6. Gai Z., Yang W. S., Zhao R. G., Sakurai T. Thermal stability and structure of the equilibrium clean Si (103) surface// Phys. Rev. 1999. Вып. 59. P. 13003.
7. Fenner D. B., Biegelsen D. K., Bringans R. D.// J. Appl. Phys. 1989. Вып. 66. P. 419.
8. Kawabe M., Ueda T. Self-annihilation of antiphase boundary in GaAs on Si (100) grown by molecular beam epitaxy// Jap. J. Appl. Phys. 1987. V. 26. P. L944.

Статья поступила в редакцию в 25 декабря 2006 г.

Structural and electrophysical properties of HgCdTe heterostructures, grown by MBE on Si (310) substrates

M. V. Yakushev, A. A. Babenko, V. S. Varavin, V. V. Vasil'ev, L. V. Mironova, D. N. Pridachin, V. G. Remesnik, I. V. Sabinina, Yu. G. Sidorov, A. O. Suslyakov
Institute of Semiconductor Physics, Novosibirsk, Russia

Hg_{1-x}Cd_xTe layers with x value equal to 0.3—0.34 were grown on Si (310) substrates by MBE method. Carrier concentration and mobility in the grown films were measured by Hall method. Density of stacking faults, sprouting dislocations and antiphase boundaries were measured by the method of the selective etching. The density of macroscopic V-defects was defined. Matrix of 128×128 photodiodes was made. One has critical frequency of photosensitivity $\lambda_{1/2}(77\text{ K}) = .,07\ \mu\text{m}$ and good photoelectric parameters.

УДК 621.383

Воздействие ионизирующего излучения на электрические и фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе Cd_xHg_{1-x}Te

Ш. О. Эминов, А. А. Раджабли, Т. И. Ибрагимов
Институт физики НАН Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан

Изучено воздействие импульсного гамма-излучения и нейтронного облучения на фотоэлектрические и электрофизические свойства p-n-переходов в Cd_xHg_{1-x}Te (x), полученных диффузией различных элементов (Cu, Ag, Au, Hg, Pt), а также ионной имплантацией различных ионов (B⁺, Al⁺, P⁺). Показано, что электрические и фотоэлектрические характеристики ионно-имплантационных p-n-переходов значительно улучшаются после радиационного облучения, в то время как свойства диффузионных фотодиодов существенно не изменились.

Узкозонный полупроводниковый твердый раствор Cd_xHg_{1-x}Te ($0 \leq x \leq 1$) (КРТ) в настоящее время остается одним из основных материалов для изготовления приемников излучения ближнего и среднего ИК-диапазона для систем военного и космического применения.

Из-за относительно низкого энергетического порога образования собственных дефектов в результате различных механических, термических и прочих воздействий, которым обычно подвергаются кристаллы в процессе изготовления приборов ИК-фотоэлектроники, в том числе при шлифовке и полировке, диффузии, эпитаксиальном росте, ионной имплантации, фотолитографии и др., в кристаллической структуре КРТ наблюдаются существенные изменения.

Наряду с вышеуказанными воздействиями для создания приборов также используются методы облучения кристаллов электронами, протонами, нейтронами и γ -квантами различных энергий. От-

личительной особенностью этих воздействий является то, что если часть механических и термических воздействий на приборы практически прекращается после изготовления приборов (за исключением климатических воздействий), то полупроводниковые приборы, используемые в космической технике, постоянно подвержены радиационным воздействиям космических лучей широкого энергетического спектра. Так, например, незащищенные приборы на спутниках Земли могут получить за один год дозу облучения, превышающую 10^6 рад в основном за счет протонов и электронов высоких энергий, захваченных радиационными поясами Ван Алена. В промышленных ядерных установках приборы в основном подвергаются нейтронному облучению и γ -радиации. При этом характерные интегральные дозы облучения составляют, соответственно, 10^{11} нейтронов на 1 см^2 и 10^4 рад — для γ -лучей. Следует отметить, что можно сравнительно легко защитить приборы