УДК 621.383.001.66

ПРИБОРНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ДИСИЛИЦИДА ЖЕЛЕЗА β -FeSi₂ (ОБЗОР)

Е.Г. Полякова

ФГУП «МНИИРИП», 141002, МО, г. Мытищи, ул. Колпакова, д. 2А

Рассмотрены способы изготовления и свойства светодиодов, фотодиодов и солнечных элементов на основе преципитатов/нанокристаллитов и сплошных плёнок дисилицида железа β -FeSi₂, совместимых с существующей кремниевой технологией. Приведены данные о параметрах рассмотренных приборов. Показано, что широкое применение β -FeSi₂ для создания оптоэлектронных и фотовольтаических приборов может быть реализовано при улучшении структурных свойств слоёв Si/ β -FeSi₂/Si.

Ключевые слова: дисилицид железа, β -FeSi₂, гетероструктура, светодиод, фотодиод, солнечный элемент

Сведения об авторах: Полякова Елена Георгиевна, начальник лаборатории Испытательного центра ФГУП «МНИИРИП», polakkk_2000@mail.ru

.....

DEVICE STRUCTURES BASED ON β -FeSi₂ (OVERVIEW)

E.G. Polyakova

FSUE «MNIIRIP», Russia, 141002, Moscow Region, Mytishchi, 2A Kolpakova str.

Methods for producing light-emitting diodes, photodiodes and solar cells based on precipitates/nanocrystallites and β -FeSi₂ solid films compatible with existing silicon technologies and their properties are considered in this paper. Investigated device's parameters are given. It is shown that wide adoption of β -FeSi₂ in the production of optoelectronic and photovoltaic devices is possible if the necessary steps are taken towards the improvement of structural properties of Si/ β -FeSi₂/Si.

Keywords: iron disilicide, β -FeSi₂, heterostructure, light-emitting diode, LED, photodiode, solar cell

Authors: Elena Georgievna Polyakova, Head of Laboratory of the Test Centre of FSUE «MNIIRIP», email: polakkk_2000@mail.ru

Введение

Для разработки новых оптоэлектронных устройств на основе Si значительный интерес представляют силициды, образованные переходными металлами VI, VII и VIII групп: FeSi₂, CrSi₂, BaSi₂, MnSi₂, OsSi₂ и ReSi₂ [1-5]. Для этой группы силицидов металлов полупроводниковая фаза является наиболее устойчивой. Особенно интересным материалом, обладающим уникальными свойствами для оптоэлектронных и фотовольтаических применений, является орторомбическая структура дисилицида железа – β -FeSi₂.

Большое количество экспериментальных результатов указывает на прямую запрещённую зону в β -FeSi₂, равную 0.85-0.87 эВ [6-10]. Оптическая ширина запрещённой

зоны 0.85 эВ соответствует излучению с длиной волны 1.5 мкм, что подходит для изготовления оптоэлектронных устройств (светодиодов, фотодетекторов), пригодных в том числе и для использования в кварцевых волоконно-оптических линиях связи.

β -FeSi₂ имеет чрезвычайно высокий коэффициент оптического поглощения (выше $1 \cdot 10^5$ см⁻¹) при энергии чуть выше запрещённой зоны (~1 эВ), и эта особенность может быть использована для изготовления тонких (< 1.0 мкм) солнечных элементов с теоретической эффективностью преобразования солнечной энергии до 23 % [11].

Показатели преломления β -FeSi₂ и Si равны 5.6 и 3.5 соответственно. Двойная структура Si/ β -FeSi₂/Si, имеющая энергетические зазоры 1.1 эВ (Si) и 0.85 эВ (β -FeSi₂), может

формировать идеальные оптические и электрические ограничивающие слои, т.е., по сути, представляет собой оптический резонатор для изготовления светоизлучающего диода и, далее, лазерного диода.

Полупроводник $\beta\text{-FeSi}_2$ химически стабилен вплоть до температуры 937 °С, поскольку при этой температуре происходит фазовое превращение $\beta\text{-FeSi}_2$ (полупроводник) в $\alpha\text{-FeSi}_2$ (металл) [12]. Кроме того, по сравнению с соединениями $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ коэффициенты испарения составляющих атомов дисилицида железа при температуре 937 °С чрезвычайно малы: порядка 10^{-4} Па и 10^{-6} Па соответственно, поэтому распада соединения не происходит.

$\beta\text{-FeSi}_2$ обладает высокой устойчивостью к влаге, химическим воздействиям и окислению и может быть классифицирован как экологически безопасный полупроводник.

Дисилицид железа может быть сформирован или в форме островков/преципитатов, или в виде эпитаксиальных сплошных тонких плёнок на Si (001) и Si (111).

1. Светодиоды на основе преципитатов $\beta\text{-FeSi}_2$

Впервые светодиод на основе преципитатов $\beta\text{-FeSi}_2$ был создан в 1997 г. в университете г. Сюррей, Великобритания, группой Homewood и др. [13]. Они объединили прямозонный $\beta\text{-FeSi}_2$ со стандартным $p\text{-}n$ кремниевым диодом. Светодиоды были созданы таким образом, чтобы преципитаты $\beta\text{-FeSi}_2$ находились вне обеднённой области n^+-p перехода (но вблизи неё) для обеспечения путей прямой излучательной рекомбинации носителей через $\beta\text{-FeSi}_2$. Светодиод представлял собой подложку Si (100) n -типа, далее – слой $n^+\text{-Si}$ (легирующая примесь Sb с концентрацией $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 400 нм и слой $p\text{-Si}$ (легирующая примесь B с концентрацией $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) толщиной 1000 нм. Преципитаты $\beta\text{-FeSi}_2$ располагали в слое $p\text{-Si}$. Омические контакты (Al и кольцевой AuSb) осаждали вакуумным напылением.

На рис. 1 показаны схема созданного светодиода, его вольт-амперная характеристика (ВАХ), измеренная при комнатной температуре, и зависимость электролюминесценции (ЭЛ) данной структуры от длины волны.

Для определения оптимальной конфигурации прибора был создан ряд светодиодов, отличающихся толщиной p -слоя (360-1000 нм) и глубиной залегания преципитатов $\beta\text{-FeSi}_2$

[14]. Площадь светодиодов составляла $8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. Измерения интенсивности ЭЛ как функции температуры, выполненные на этих светодиодах, показали, что чем больше расстояние между поверхностью образца и областью, где происходит инжекция носителей и прямая рекомбинация, тем меньшее подавление ЭЛ происходит при повышении температуры от 80 К до 300 К, т.е. до комнатной.

а)

б)

в)

Рис. 1

а) схематическое изображение светодиода на основе Si/ $\beta\text{-FeSi}_2$; б) ВАХ работающего светодиода, измеренная при комнатной температуре; обратный ток утечки равен 3 мкА; в) зависимость ЭЛ от длины волны, измеренной при 80 К (прямой ток через светодиод составлял 15 мкА) [13]

На рис. 2 приведено схематическое изображение МОП туннельного светодиода с преципитатами, внедрёнными в активную область [15]. Толщина слоя SiO_2 составляет 4.6 нм. Контакты Ti-W/Au размером 2x2 мм формировали методом литографии, а с обратной стороны образца на подложку p -Si магнетронным напылением осаждали слой Al.

При отрицательном смещении на верхнем решёточном контакте электроны металла туннелируют в Si матрицу сквозь тонкий слой оксида и захватываются преципитатами $\beta\text{-FeSi}_2$, ответственными за светоизлучающий процесс. Отрицательное смещение от верхнего контакта создаёт дырки вблизи границы раздела SiO_2/Si , формируя обогащённый слой. Туннелирующие в зону проводимости электроны рекомбинируют с дырками из обогащённого слоя, что и вызывает эмиссию от преципитатов $\beta\text{-FeSi}_2$.

На рис. 3 приведены ВАХ этого прибора, измеренные при различных температурах [15]. Подобные характеристики являются типичными для МОП туннельных структур [16]. Туннелирование электронов начинается при смещении ≥ 1 В. При напряжении прямого смещения > 2 В туннелирующие электроны становятся основными носителями заряда. Тонкий слой оксида гарантирует, что для данного МОП диода носители поступают в основном от туннелирования и что при отрицательном смещении на верхнем контакте дырки могут быть притянуты в область, расположенную прямо под границей раздела SiO_2/Si .

Рис. 2

Схематическое изображение МОП туннельной структуры; на вкладке изображена зонная диаграмма светонизлучающего процесса [15]

Рис. 3

ВАХ работающего прибора, измеренная при различных температурах; на вкладке показано полученное методом просвечивающей электронной микроскопии изображение прибора; пунктирной линией выделен преципитат $\beta\text{-FeSi}_2$ [15]

Рис. 4

Спектр ЭЛ МОП туннельного диода с преципитатами $\beta\text{-FeSi}_2$, внедрёнными в активную область: а) при плотностях тока инжекции, равных 0.2 А/см², 0.8 А/см², 1.6 А/см² и 2 А/см² соответственно ($T = 80$ К); б) при температурах от 80 К до 260 К и токе возбуждения 2 А/см² [15]

ЭЛ в явном виде наблюдается при малой плотности тока 0.2 А/см² (рис. 4). Увеличение плотности тока инжекции от 0.2 А/см² до 2 А/см² увеличивает интенсивность сигнала ЭЛ; форма спектра не изменяется. Увеличение температуры заметно снижает интенсивность сигнала, также наблюдается сдвиг максимума пиков в длинноволновую область.

Небольшое пороговое значение возбуждения ЭЛ и линейная зависимость интенсивности ЭЛ от плотности тока свидетельствуют о малом количестве центров безызлучательной рекомбинации. Эмиссия света в данном МОП туннельном диоде происходит при рекомбинации носителей за счёт перехода «зона-зона» в преципитатах $\beta\text{-FeSi}_2$.

Светодиоды, созданные на основе кремниевый p - n перехода со встроенными нано-

частицами $\beta\text{-FeSi}_2$, продемонстрировали ЭЛ при длине волны 1.6 мкм при комнатной температуре, однако квантовая эффективность была очень низкой, и для получения ЭЛ при комнатной температуре требовалась высокая плотность прямого тока (рис. 5) [17,18].

Рис. 5

Спектры ЭЛ при нескольких токах прямого смещения, измеренные при комнатной температуре; на вставке показана связь между плотностью тока и интенсивностью ЭЛ [17]

Интенсивность сигнала ЭЛ в подобных структурах пытались усилить либо за счёт увеличения концентрации наночастиц $\beta\text{-FeSi}_2$ в активной области прибора $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$ [19], либо за счёт увеличения размеров частиц $\beta\text{-FeSi}_2$ [20].

Было установлено, что увеличение размера наночастиц $\beta\text{-FeSi}_2$ просто увеличивает плотность дефектов в окружающем Si. Напротив, в двухслойных и трёхслойных структурах наблюдалось значительное улучшение ЭЛ при низких температурах.

Для гетеросистем $\text{Si}/\beta\text{-FeSi}_2$ характерны два фактора, ограничивающие фоточувствительность: 1) диффузия атомов Fe в кремниевую подложку приводит к образованию глубоких уровней захвата носителей; 2) на гетерогранице $\text{Si}/\beta\text{-FeSi}_2$ образуются оборванные связи вследствие зернистой структуры получаемых плёнок $\beta\text{-FeSi}_2$ и большого несоответствия параметров кристаллических решёток [21]. Для минимизации влияния этих двух факторов группой исследователей из Института автоматики и процессов управления ДВО РАН (г. Владивосток) был выбран способ созда-

ния фотодиодов, основанный на твёрдофазном эпитаксиальном формировании нанокристаллитов (НК) $\beta\text{-FeSi}_2$ непосредственно в области кремниевого $p\text{-}n$ перехода в условиях сверхвысокого вакуума [22]. Метод твёрдофазной эпитаксии подразумевает осаждение атомов Fe на холодную подложку Si, что значительно снижает диффузию Fe в Si. Таким образом, формирование $\beta\text{-FeSi}_2$ именно в форме НК приводит к уменьшению влияния указанных выше факторов, ограничивающих фотоотклик системы.

На Si (100)- или Si (111)-подложку одного типа проводимости (p -типа) осаждали буферный слой нелегированного кремния толщиной 100-200 нм, на котором далее проводили формирование дисилицида железа в виде 5-40-нанометровых кристаллитов $\beta\text{-FeSi}_2$, упруго встроенных в кремниевую матрицу. Сверху осаждали слой нелегированного кремния толщиной 100-200 нм – буферный слой. Далее формировали слой кремния другого типа проводимости (n -типа) толщиной 100-200 нм, обеспечивая формирование $p\text{-}n$ перехода в структуре светоизлучающего элемента. На подложке кремния первого типа проводимости формировали отрицательный электрод, а на верхнем слое Si второго типа проводимости – положительный [23].

На рис. 6 приведены спектральные характеристики внешней квантовой эффективности для данных структур. Встраивание НК приводит к увеличению интегральной эффективности на 2 порядка в ближней ИК области спектра. $\text{Si}/\text{HK } \beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$ структура при охлаждении обладает эффективностью более 5 % и 2 % в первом и втором окнах прозрачности кварцевого оптоволокна при охлаждении до азотных температур.

На рис. 7 представлены спектральные характеристики фоточувствительности при комнатной температуре для сформированной гетероструктуры, содержащей 7 слоёв НК (для каждого слоя осаждали 0.4 нм Fe), и кремниевого $p\text{-}n$ перехода без НК. Добавление в систему суммарно всего 3 нм Fe приводит к расширению спектрального диапазона чувствительности кремниевого детектора (вплоть до 1700 нм), при этом отклик увеличивается в среднем на два порядка; НК $\beta\text{-FeSi}_2$ на порядок увеличивают отклик в диапазоне чувствительности 1000-1200 нм. Путём встраивания НК авторам удалось улучшить отклик Si фотодетектора в ближнем

ИК-диапазоне: интегральная чувствительность в этом диапазоне составляет 0.2 % от чувствительности в видимом диапазоне.

Рис. 6

Спектральные характеристики фоточувствительности для гетероструктуры и эталона при комнатной температуре [22]

При комнатной температуре фотоотклик для первого и второго окна прозрачности кварцевых волокон составляет величину порядка 2-3 мА/Вт.

По сравнению с плёнками $\beta\text{-FeSi}_2$ на Si данные гетероструктуры обладают близким значением детектирующей способности – $1.2 \cdot 10^{10}$ см $\sqrt{\text{Гц}}$ ^{1/2}/Вт при 120 К ($1.1 \cdot 10^{11}$ см $\sqrt{\text{Гц}}$ ^{1/2} – значение для плёнок) и одинаковой величиной фотоотклика для первого окна прозрачности при комнатной температуре – порядка 2-3 мА/Вт [24].

2. Светодиоды на основе сплошных плёнок $\beta\text{-FeSi}_2$

ЭЛ на длине волны 1.56 мкм при комнатной температуре от сплошного слоя $\beta\text{-FeSi}_2$ была впервые реализована в диоде на основе гетероперехода $p\text{-Si}/\beta\text{-FeSi}_2/n\text{-Si}$, созданного на Si (111) путём роста сплошной высокоориентированной плёнки $\beta\text{-FeSi}_2$ [25, 26]. Светодиод на основе такой плёнки демонстрировал высокотемпературную люминесценцию при значительно сниженной плотности прямого тока – 0.264 А/см² (рис. 7).

Улучшение характеристик высокотемпературной ЭЛ может быть вызвано несколькими факторами: большим объёмом $\beta\text{-FeSi}_2$ (сплошная плёнка толщиной 200-250 нм); снижением количества дефектов на границе раздела [110] $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$ (111); улучшением кристалличности после высоко-

температурного отжига и с преобладанием ориентации [110] (основано на данных рентгенографического анализа эпитаксиальных плёнок $\beta\text{-FeSi}_2$).

Были созданы светодиоды на основе сплошных слоёв $\beta\text{-FeSi}_2$, проявляющие ЭЛ на длине волны 1.56 мкм [27-31]. в этих светодиодах была продемонстрирована ЭЛ при комнатной температуре, причём интенсивность ЭЛ возрастала с увеличением толщины активного слоя $\beta\text{-FeSi}_2$, вплоть до 1 мкм.

Рис. 7

Спектр ЭЛ, полученный при комнатной температуре от $p\text{-Si}/\beta\text{-FeSi}_2/n\text{-Si}$ (111) светодиода при прямом смещении и плотности тока от 0.133 А/см² до 1.46 А/см²; синим цветом показан спектр ФЛ при комнатной температуре от плёнки $\beta\text{-FeSi}_2$, выращенной методом реактивного осаждения Fe на горячую (700-760 °С) подложку Si (111) с последующим отжигом при температуре 830 °С [25]

Светодиоды на основе сплошного слоя (или слоёв) $\beta\text{-FeSi}_2$ на Si (100) подложках при комбинировании методов реактивной и молекулярно-лучевой эпитаксии были получены без последующей высокотемпературной обработки приборной структуры [32,33]. И хотя эти светодиоды также давали ЭЛ при комнатной температуре на длине волны 1.56 мкм, люминесцентные свойства этих светодиодов были обычно хуже, чем аналогичные свойства светодиодов, созданных на Si (111), вследствие худшего качества кристалличности, обусловленного отсутствием высокотемпературного отжига и использованием тонких активных слоёв $\beta\text{-FeSi}_2$ (~10 нм).

Использование в светодиодах, созданных на $p\text{-Si}$ (001) подложках, двойной гетероструктуры $n^+\text{-Si}/\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ (300 нм)/[100]- $\beta\text{-FeSi}_2$ (200 нм)/ $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ (750 нм) позво-

лило увеличить интенсивность сигнала ЭЛ [34].

ЭЛ при комнатной температуре этих светодиодов свидетельствует о значительном уменьшении минимума пороговой плотности тока ($\sim 1 \text{ A/cm}^2$), необходимого для возбуждения ЭЛ. Это наименьшее значение пороговой плотности тока для возбуждения ЭЛ из всех значений для светодиодов на основе $\beta\text{-FeSi}_2$. И это значение примерно в 10 раз меньше значения пороговой плотности тока для светодиодов, созданных на Si (111) с эквивалентной толщиной слоя $\beta\text{-FeSi}_2$ [34].

Подобное уменьшение порогового значения плотности тока для возбуждения ЭЛ может быть соотнесено с эффективным уменьшением межфазных центров безызлучательной рекомбинации, вызванным применением слоя $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$, который обладает лучшим соответствием параметров решётки с решёткой $\beta\text{-FeSi}_2$, чем чистый Si. Несмотря на снижение порогового тока возбуждения ЭЛ, значение ЭЛ при комнатной температуре, по-прежнему, является неудовлетворительным из-за сильного термического гашения ЭЛ при увеличении температуры.

3. Фотодиод на основе $\beta\text{-FeSi}_2$

На рис. 8 показана схема фотодиода на основе $\beta\text{-FeSi}_2$ [35]. Устройство представляет собой простую $p\text{-}n$ гетероструктуру, выращенную без отжига или пассивирования.

Рис. 8

Схема поперечного сечения $n\text{-}\beta\text{-FeSi}_2 / p\text{-Si}$ гетероперехода фотодиода; свет падает на переднюю сторону подложки Si, которая действует как материал окна [35]

На рис. 9 приведены (ВАХ) этого фотодиода, измеренные в темноте и при освещении светом с длиной волны 1.31 мкм [36]. Устройство показало хорошие выпрямляющие свой-

ства, сходные с традиционными $p\text{-}n$ переходами. Прямой ток был примерно на два порядка величины больше обратного тока. Темновой ток утечки при обратном смещении -1 В составлял 5 мкА, и это значение увеличивалось до 20 мкА при -5 В . Авторы полагают, что основным источником тока утечки являлась диффузия атомов Fe из $\beta\text{-FeSi}_2$ в подложку Si во время процесса осаждения плёнки. Продиффундировавшие и распределённые в объёме подложки атомы приводят к созданию центров утечки и ловушек для фотогенерированных носителей в дополнение к дефектам границ раздела. Измеренный фототок при нулевом смещении составлял $\sim 20 \text{ мкА}$, и это значение увеличивалось до 70 мкА при -5 В . Отношение фототока к току утечки при -1 В составляло приблизительно один порядок величины. Текущая чувствительность при нулевом смещении оценивалась в $\sim 3.3 \text{ мА/Вт}$.

Рис. 9

ВАХ фотодиода, измеренные в темноте и при освещении светом с длиной волны 1.31 мкм (мощность освещения 6 мВт); на вставке – динамическое сопротивление перехода, полученное из темновых ВАХ [36]

На вставке рис. 9 показано динамическое сопротивление перехода, полученное из темновых ВАХ. Поскольку основным компонентом шума при нулевом смещении является шум Джонсона (тепловой шум), детектирование устройства оценивалось по значениям динамического сопротивления и чувствительности при нулевом смещении. Детектируемость при комнатной температуре при освещении светом с длиной волны 1.31 мкм составила $1.5 \times 10^9 \text{ см (Гц Вт)}^{1/2}$. Внешняя квантовая эффективность на длине волны 1.31 мкм и обратном смещении -5 В составила 1.07 %.

Для улучшения работы устройства (уменьшения тока утечки и повышения квантовой эффективности) между плён-

кой $\beta\text{-FeSi}_2$ и подложкой выращивали собственный слой кремния $i\text{-Si}$. Поверх этого слоя осаждали слой $\beta\text{-FeSi}_2$, формируя $p\text{-}i\text{-}n$ гетероструктуру [37].

На рис. 10 показаны ВАХ фотодиода [$n\text{-тип } \beta\text{-FeSi}_2 / i\text{-Si} / p\text{-тип Si}$] площадью 3 мм^2 , измеренные в темноте и при освещении лазером с длиной волны 1.31 мкм при мощности 6 мВт . Устройство продемонстрировало хорошее выпрямляющее

поведение с коэффициентом выпрямления более двух порядков. Ток утечки не насыщался и монотонно увеличивался с обратным напряжением до тех пор, пока устройство не испытало тепловой пробой. Из-за $i\text{-Si}$ слоя ток утечки, измеренный в этом устройстве, был меньше, чем измеренный в фотодиодах [$n\text{-тип } \beta\text{-FeSi}_2 / p\text{-тип Si}$] [36].

Рис. 10

а) ВАХ фотодиода [$n\text{-тип } \beta\text{-FeSi}_2 / i\text{-Si} / p\text{-тип Si}$] площадью 3 мм^2 , измеренные в темноте и при освещении лазером с длиной волны 1.31 мкм при мощности 6 мВт ; б) зависимость внешней квантовой эффективности от обратного напряжения, измеренная при освещении лазером с длиной волны 1.31 мкм [37]

Фототок, полученный при освещении светом с длиной волны 1.31 мкм , увеличился с 40 до 840 мкА при увеличении обратного напряжения от 0 до 5 В . Отношение фототока к току утечки по всему диапазону измерения обратных напряжений составляло примерно два порядка величины. Токовая чувствительность увеличилась с 6.6 до 140 мА / Вт при увеличении обратного напряжения от 0 до 5 В , как показано на рис. 10б. Детектируемость при 300 К при освещении светом с длиной волны 1.31 мкм составила $2.8 \times 10^9 \text{ см (Гц Вт)}^{1/2}$.

Группой российских исследователей был создан фотодиод на основе НК дисилицида железа. На монокристаллической кремниевой подложке $n\text{-типа}$ ориентации (001) поочередно осаждали слой Fe толщиной 0.2 нм с последующим отжигом при 630°C и слаболегированный ($N_a = 1 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$) слой Si $p\text{-типа}$ толщиной 200 нм . Для получения много-

слойной структуры шаги повторяли четыре раза. Для фотовольтаических измерений из полученной структуры формировали мезадиод. Для создания контакта с $n\text{-Si}$ использовали сплав Au-Sb , для создания контакта с $p\text{-Si}$ – Al [38].

На рис. 11 показана ВАХ структуры фотодиода $p\text{-Si}/\beta\text{-FeSi}_2 \text{ HK/Si}/\dots/n\text{-Si}$ (001), измеренная при 120 К [39]. Диод демонстрирует хорошее выпрямляющее действие: ток при прямом смещении примерно на три порядка величины больше, чем при обратном смещении. Оценочные значения сечений и шунтирующих сопротивлений для фотодиодной структуры, содержащей НК $\beta\text{-FeSi}_2$, составляют 1 кОм и 20 МОм , соответственно. Фотодиод продемонстрировал ток насыщения 1.2 нА .

Измеренные спектры тока фотоотклика структур при 120 К по сравнению с эта-

лонным диодом Si, не содержащим НК $\beta\text{-FeSi}_2$, представлены на рис. 12. Помещение в кремниевый p - n переход только четырёх слоёв НК $\beta\text{-FeSi}_2$ привело к: 1) усилению спектрального диапазона fotocувствительности до 1600-1700 нм (0.8-0.7 эВ); 2) усилению фотоотклика более чем на один порядок на длинах волн телесвязи без применения обратного смещения; 3) возможности повышения эффективности фотодетектирования более чем на четыре порядка путём изменения обратного смещения в широком диапазоне длин волн.

Рис. 11

ВАХ структуры фотодиода $p\text{-Si}/\beta\text{-FeSi}_2$ НК/Si.../n-Si (001), измеренная при 120 K [39]

Рис. 12

Спектры тока фотоотклика структур $p\text{-Si}/\beta\text{-FeSi}_2$ НК/Si.../n-Si (001), содержащих четыре слоя НК $\beta\text{-FeSi}_2$, измеренные при 120 K по сравнению с эталонным диодом Si, не содержащим НК $\beta\text{-FeSi}_2$ [39]

На основе измерений фотоотклика была проведена оценка спектральной зависимости полученного фотодиода. Без смещения фотодиод продемонстрировал внешнюю квантовую эффективность около 1 % при 1300 нм, при обратном смещении, равном -30 В, внешняя квантовая эффективность составила 10 %. Заметное увеличение эффективности почти до такой же величины было чётко обнаружено во втором окне прозрачности кварцевого волокна при 1.55 мкм.

На рис. 13 показана температурная зависимость интегрального значения внешней квантовой эффективности структуры, определённая в интервале длин волн от 1250 до 1700 нм с указанием возможных механизмов переноса фотогенерированных носителей. Та же тенденция наблюдалась в работе [24]. В температурном интервале 200-300 K интегральное значение внешней квантовой эффективности проявляет линейную зависимость, что свидетельствует о преобладании механизма переноса носителей путём диффузии. В температурном диапазоне 120-200 K вероятным механизмом является генерация-рекомбинация носителей, которая происходит на гетерограницах и создаёт токи утечки.

Рис. 13

Температурная зависимость интегрального значения внешней квантовой эффективности структуры, определённая в интервале длин волн от 1250 до 1700 нм с указанием возможных механизмов переноса фотогенерированных носителей; на вставке рисунка представлена зонная диаграмма диодной структуры в равновесном состоянии [39]

Детектируемость при 120 K в условиях нулевого смещения при освещении светом с длиной волны 1.31 мкм составила 2.1×10^{11} см (Гц Вт)^{1/2} и 6.5×10^9 см (Гц Вт)^{1/2}

при освещении светом с длиной волны 1.55 мкм. При обратном смещении –30 В эти значения были равны $4.8 \cdot 10^{10}$ см (Гц Вт)^{1/2} и $2.4 \cdot 10^{10}$ см (Гц Вт)^{1/2}, соответственно.

Измеренная фоточувствительность, равная 15-16 мА/Вт, почти в пять раз больше по сравнению со сплошной плёнкой дисилицида, хотя данная структура содержит в 100 раз меньше дисилицида по сравнению со структурой, описанной в работе [24].

Предполагается, что экспоненциальное увеличение эффективности, ранее не наблюдавшееся для $\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$ гетеропереходов, связано с началом лавинообразного увеличения концентрации носителей при достаточно высоком значении напряжения; к тому же нанокристаллиты могут действовать как локальные неоднородности, что приводит к ещё большему возрастанию электрического поля, вызывающего лавину. Кроме того, кремний широко известен как хороший полупроводник для лавинного фотодиода. Для объяснения процесса сбора фотогенерированных носителей была предложена зонная диаграмма диодной структуры в равновесном состоянии, представленная на вставке рис. 13. После генерации носителей в нанокристаллитах они диффун-

дируют в слои p -типа кремния, где их разделяет встроенный потенциал $\text{Si } p\text{-}n$ перехода. Затем происходит ускорение носителей электрическим полем, и они могут получать достаточную энергию для воздействия на ионизацию атомов кремния, тем самым развивая лавину.

Таким образом, предлагаемая диодная структура обладает значительным фотооткликом при энергиях ниже ширины запрещённой зоны кремния, что связано с поглощением и образованием носителей в НК $\beta\text{-FeSi}_2$. Несмотря на то, что структура содержит в 100 раз меньше дисилицида железа, она демонстрирует в несколько раз большую фоточувствительность (по сравнению со сплошной плёнкой дисилицида), более высокое значение внешней квантовой эффективности и способности детектирования на длинах волн, важных для систем волоконно-оптической связи.

4. Солнечные батареи на основе $\beta\text{-FeSi}_2$

Дисилицид железа обладает рядом полезных свойств с точки зрения использования его в качестве полупроводника для применений в составе солнечных элементов (таблица).

Таблица

Сравнение свойств $\beta\text{-FeSi}_2$, кристаллического Si и GaAs с точки зрения применения в солнечных элементах

	$\beta\text{-FeSi}_2$	Si	GaAs
Ширина запрещённой зоны, эВ	0.85	1.11	1.43
Коэффициент оптического поглощения, см ⁻¹	$> 10^5$	$10^3\text{-}10^4$	10^4
Толщина, необходимая для создания солнечного элемента, мкм	1	300	10
Плотность, г/см ³	4.93	2.33	5.33
Стойкость к космическим лучам и радиации	высокая	низкая	низкая
Температурная стабильность, °C	937	1000	500

Высокий коэффициент оптического поглощения $\beta\text{-FeSi}_2$ позволяет изготовить относительно тонкий (<1.0 мкм) солнечный элемент по сравнению с кристаллическим или поликристаллическим кремниевым солнечным элементом.

Для создания солнечного элемента на подложке Si (111) p -типа был сформирован высококачественный гетеропереход $n\text{-}\beta\text{-FeSi}_2/p\text{-Si}$ с резкой границей раздела [44, 45]. После

отжига омические контакты формировали путём нанесения с последующим отжигом Al со стороны $\beta\text{-FeSi}_2$ и AuSb – со стороны Si.

Эффективность преобразования ячейки солнечного элемента размером 4x4 мм² без антиотражающего покрытия с воздушной массой 1.5 составила 3.7 %. На рис. 14 показана структура этого солнечного элемента и его ВАХ при освещении солнечным светом.

Рис. 14

Структура солнечного элемента и его ВАХ при освещении солнечным светом [45]

Поскольку поверхность $\beta\text{-FeSi}_2$ отражает 40 % видимого солнечного света, то для усиления светопоглощения необходимо использовать антиотражающее покрытие и слой пассивирования поверхности [44, 46].

Помимо использования в качестве единственного поглотителя света, $\beta\text{-FeSi}_2$ также может быть интегрирован в tandemных ячейках в качестве длинноволнового поглотителя света вместе с другими широкозонными полупроводниками, что позволит усилить оптическое поглощение в длинноволновой области спектра солнечного света (вплоть до длины волны $\lambda \sim 1450$ нм).

Предполагается, что производительность tandemных ячеек аморфный кремний/микроструктурированная тонкая плёнка кремния ($\alpha\text{-Si}/\text{мк-Si}$) улучшится ещё больше, если менее эффективный поглотитель инфракрасного света заменить на длинноволновый поглотитель света $\beta\text{-FeSi}_2$ ($\alpha > 1 \times 10^5 \text{ см}^{-1}$ при $\lambda < 1240$ нм для $\beta\text{-FeSi}_2$ против $\alpha > 1 \times 10^3 \text{ см}^{-1}$ при $\lambda > 820$ нм для мк-Si) [47].

До настоящего времени большинство тонкоплёночных солнечных элементов $\beta\text{-FeSi}_2$ были получены путём выращивания плёнок $\beta\text{-FeSi}_2$ на подложках Si (111) или Si (100) в виде гетеропереходов. Имеется ряд сообщений о гидрогенизованных аморфных тонкоплёночных солнечных элементах из дисилицида железа, сформированного на Si (111) [30] и на стеклянных подложках [48].

Эти результаты демонстрируют возможность создания тонкоплёночных элементов на основе FeSi_2 на разных типах подложек,

включая гибкие (например, тонкую нержавеющую сталь), при низких температурах обработки ($\sim 200\text{-}300$ °C) с использованием таких традиционных технологий изготовления, как плазмохимическое осаждение (PECVD) и испарение электронным пучком.

Выводы

Уникальный набор свойств $\beta\text{-FeSi}_2$, таких как прямая запрещённая зона, оптическая ширина которой равна 0.85 эВ (1.5 мкм), высокий коэффициент оптического поглощения, химическая стабильность, высокая устойчивость к влаге, химическим воздействиям и окислению, экологическая безопасность, совместимость с существующей кремниевой технологией, делают дисилицид железа перспективным материалом для создания оптоэлектронных и фотовольтаических приборов. Ограничения в его применении связаны с невозможностью получения в настоящее время совершенной гетероструктуры $\text{Si}/\beta\text{-FeSi}_2/\text{Si}$. Поликристалличность плёнки $\beta\text{-FeSi}_2$ и несовершенство структуры укрывающей плёнки Si, выращенной поверх слоя $\beta\text{-FeSi}_2$, несоответствие параметров решёток дисилицида железа и кремния – всё это вызывает появление дефектов. Дефекты являются причиной низкой подвижности и короткого времени жизни неосновных носителей заряда (электронов) и причиной появления большого числа центров безызлучательной рекомбинации и, как следствие, низкой эффективности работы приборов, созданных на основе такой гетероструктуры.

Литература

- Derrien J., Chevrier J., Vinh L.T., Mahan J.E. Semiconducting silicide-silicon heterostructures: growth, properties and applications // *Applied Surface Science* – vol. 56-58 - 1992 - C 382-393.
- Reeson K.J., Sharpe J., Harry M., Leong D., McKinty C., Kewell A., Lourenco M., Chen Y.L., Shao G., Homewood K.P. Is there a future for semiconducting silicides? // *Microelectronic Engineering* – vol.50 – 2000 – C. 223-235.
- Borisenko V.E. (Ed.) *Semiconducting silicides: basics, formation, properties* Springer-Verlag, Berlin, 2000 – C. 348.
- Maex K. and van Rossum M. (Eds.), *Properties of metal silicides*, INSPEC, IEE, London, UK, 1995–C. 335.
- Ivanenko L.I., Shaposhnikov V.L., Filonov A.B., Krivosheeva A.V., Borisenko V.E., Migas D.B., Miglio L., Behr G., Schumann J. Electronic properties of semiconducting silicides: fundamentals and recent predictions // *Thin Solid Films* - vol.461 - issue 1 - 2004 - C 141-147.
- Bost M.C., Mahan J.E. Optical properties of semiconducting iron disilicide thin films // *Journal of Applied Physics* - vol.58 – issue 7 - 1985 – C. 2696-2703.
- Bost M.C., Mahan J.E. A clarification of the index of refraction of beta-iron disilicide // *Journal of Applied Physics* – vol.64 – issue 4 - 1988 – C. 2034-2037.
- Bost M.C., Mahan J.E. Semiconducting Silicides as Potential Materials for electro-optic VLSI interconnects // *Journal of Vacuum Science and Technology B* - vol.4 - issue 6 – 1986 – C. 1336-1338.
- Hunt T.D., Reeson K.J., Homewood K.P., Teon S.W., Gwilliam R.M., Sealy B.J. Optical properties and phase transformations in α and β iron disilicide layers // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* - vol. 84 - issue 2 – 1994 – C. 168-171.
- Z. Yang, K.P. Homewood, M. Finney, M. Harry, K.J. Reeson Optical absorption study of ion beam synthesized polycrystalline semiconducting FeSi_2 // *Journal of Applied Physics* – vol. 78 – 1995 – C. 1958-1963.
- Libezny M., Poortmans J., Vermeulen T., Nijs J., Amesz P. H., Herz K., Powalla M., Reinsperger G.-U., Schmidt M., Hoffmann V., Lange H. // *Processing. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice, France – 1995 – C. 1326-1329*
- T.B. Massalsky (Ed.) *Binary Alloy Phase Diagram* – ASM: American Society for Metals. - 1986 – C. 2224.
- Leong D. N., Harry M. A., Reeson K., Homewood K. P. A silicon/iron-disilicide lightemitting diode operating at a wavelength of $1.5\mu\text{m}$ // *Nature* – 1997 - vol. 387 - C. 686-688.
- Lourenço M.A., Butler T.M., Kewell A.K., Gwilliam R.M., Kirkby K.J., Homewood K.P. Electrical, electronic and optical characterisation of ion beam synthesised $\beta\text{-FeSi}_2$ light emitting devices // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* - vol. 175-177 - issue 1 - 2001 - C 159-163.
- Sun C.M., Tsang H.K., Wong S.P., Cheung W.Y., Ke N., Lourenço M.A., Homewood K.P. Electroluminescence from metal-oxide-silicon tunneling diode with ion-beam-synthesized $\beta\text{-FeSi}_2$ precipitates embedded in the active region // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* - vol. 267 - issue 7 - 2009 - C 1081–1084.
- Sze S.M., Ng K. K. *Physics of Semiconductor Devices*. - 3rd Edition - John Wiley and Sons, Inc. - 2007 - C. 832.
- Suemasu T., Negishi Y., Takakura K., Hasegawa F. Room temperature $1.6\mu\text{m}$ electroluminescence from a Si-based light emitting diode with $\beta\text{-FeSi}_2$ active region // *Japanese Journal of Applied Physics* - vol. 39 - Part 2 - Number 10B - 2000 - C L1013- L1015.
18. Suemasu T., Negishi Y., Takakura K., Hasegawa F., Chikyow T. Influence of Si growth temperature for embedding $\beta\text{-FeSi}_2$ and resultant strain in $\beta\text{-FeSi}_2$ on light emission from p-Si/ $\beta\text{-FeSi}_2$ particles/n-Si light-emitting diodes // *Applied Physics Letters* - vol. 79 – issue 12 – 2001 – C 1804-1806.
- Sunohara T., Li C., Ozawa Y., Suemasu T., Hasegawa F. Growth and characterization of Si-based light-emitting diode with $\beta\text{-FeSi}_2$ -particles/Si multilayered active region by molecular beam epitaxy // *Japanese Journal of Applied Physics* - vol. 44 - Part 1 - Number 6A - 2005 - C 3951- 3953.
- Ozawa Y., Ohtsuka T., Li C., Suemasu T., Hasegawa F. Influence of $\beta\text{-FeSi}_2$ particle size and Si growth rate on $1.5\mu\text{m}$ photoluminescence from Si/ $\beta\text{-FeSi}_2$ -particles/Si structures grown by molecular-beam epitaxy // *Journal of Applied Physics* - vol. 95 – issue 10 - 2004 - C. 5483-5486.
- Han, M., Tanaka M., Takeguchi M., Zhang Q., Furuya K. High-resolution transmission electron microscopy study of interface structure and strain in epitaxial $\beta\text{-FeSi}_2$ on Si (111) substrate // *Journal of Applied Physics* - vol. 255 – issue 1-2 - 2003 - C. 93-101.
- Shevlyagin A., Goroshko D.L., Chusovitin E.A., Galkin K. N., Galkin N.G. // *Characterization of the silicon/ $\beta\text{-FeSi}_2$ nanocrystallites heterostructures for the NIR photodetection at low temperature* // *Japanese Journal of Applied Physics* - vol. 54 – Number 7S2 – 2015 –C 07JB02 (4).

23. Галкин Н.Г., Горошко Д.Л., Чусовитин Е.А. Способ создания светоизлучающего элемента // Патент на изобретение №2485632 – опубли. 20.06.2013 – Бюл. №17.
24. Izumi S., Shaban M., Promros N., Nomoto K., Yoshitake T. Near-infrared photodetection of β -FeSi₂/Si heterojunction photodiodes at low temperatures // *Applied Physics Letters* - vol. 102 – issue 3 – 2013 – C 032107(4).
25. Chu S.C., Hirohata T., Nakajima K., Kan H., Hiruma T. Room-temperature 1.56 μ m electroluminescence of highly oriented β -FeSi₂/Si single heterojunction prepared by magnetron-sputtering deposition // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 41 – Part 2 - Number 11A - 2002 – C L1200-L1202.
26. Chu S.C., Hirohata T., Kan H., Hiruma T. Electroluminescence and response characterization of β -FeSi₂-based light-emitting diodes // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 43 – Part 2 - Number 2A - 2004 – C L154-L156.
27. Takauji M., Li C., Suemasu T., Hasegawa F. Fabrication of p-Si/ β -FeSi₂/n-Si double-heterostructure light-emitting diode by molecular beam epitaxy // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 44 – Part 1 - Number 4S - 2005 – C. 2483-2486.
28. Ugajin Y., Takauji M., Suemasu T. Annealing temperature dependence of EL properties of Si/ β -FeSi₂/Si (111) double-heterostructures light-emitting diodes // *Thin Solid Films* - vol. 508 – issue 1-2 - 2006 - C. 376-379.
29. Ugajin Y., Sunohara T., Suemasu T. Investigation of current injection in β -FeSi₂/Si double-heterostructures light-emitting diodes by molecular beam epitaxy // *Thin Solid Films* - vol. 515 - issue -22 – 2007 - C. 8136-8139.
30. M. Suzuno, S. Murase, T. Koizumi, T. Suemasu, Improved Room-Temperature 1.6 μ m Electroluminescence from p-Si/ β -FeSi₂/n-Si Double Heterostructures Light-Emitting Diodes // *Applied Physics Express* - vol. 1 - Number 2-2008 – C. 021403(3).
31. Suzuno M., Koizumi T., Suemasu T. p-Si/ β -FeSi₂/n-Si double-heterostructure light-emitting diodes achieving 1.6 μ m electroluminescence of 0.4 mW at room temperature // *Applied Physics Letters* - vol. 94 - issue 21 - 2009 – C. 213509(3).
32. Murase S., Sunohara T., Suemasu T. Epitaxial growth and luminescence characterization of Si/ β -FeSi₂/Si multilayered structures by molecular beam epitaxy // *Journal of Crystal Growth* - vol. 301-302 – issue 1 - 2007 - C. 676-679.
33. Koizumi T., Murase S., Suzuno M., Suemasu T. Room-temperature 1.6 μ m electroluminescence from p⁺-Si/ β -FeSi₂/n⁺-Si diodes on Si(001) without high-temperature annealing // *Applied Physics Express* - vol. 1 - Number 5- 2008 – C. 051405(3).
34. Suzuno M., Koizumi T., Kawakami H., Suemasu T. Enhanced room-temperature 1.6 μ m electroluminescence from Si-based double-heterostructure light-emitting diodes using iron disilicide // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 49 - Number 4S - 2010 – C. 04DG16(4).
35. Dalla Betta G.F. (Ed.) *Advances in Photodiodes – InTech*. - 2011- C. 478.
36. Shaban M., Nomoto K., Izumi S., Yoshitake T. Characterization of near-infrared n-type β -FeSi₂/p-type Si heterojunction photodiodes at room temperature // *Applied Physics Letters* - vol. 94 – issue 22 – 2009 – C. 222113(4).
37. Shaban M.; Izumi S.; Nomoto K. Yoshitake T. n-type-FeSi₂/intrinsic-Si/p-type Si heterojunction photodiodes for near-infrared light detection at room temperature // *Applied Physics Letters* - vol. 95 - issue 16 - 2009 - C 162102(4).
38. N. Galkin, E. Chusovitin, T. Shamirsaev, A. Gutakovski, A. Latyshev Growth, structure and luminescence properties of multilayer Si/ β -FeSi₂ NCs/Si/.../Si nanoheterostructures // *Thin Solid Films* - vol. 519- issue 24 – 2011 - C. 8480–8484.
39. Shevlyagin A., Goroshko D., Chusovitin E, Galkin K., Galkin N. Characterization of the silicon/ β -FeSi₂ nanocrystallites heterostructures for the NIR photodetection at low temperature // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 54 - Number 7S2 - 2015 - C 07JB02 (4).
40. Kakemoto H., Makita Y., Sakuragi S., Tsukamoto T. Synthesis and properties of semiconducting iron disilicide β -FeSi₂ // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 38 – Part 1 - Number 9A - 1999 - C 5192-5199.
41. Kakemoto H., Makita Y., Kino Y., Sakuragi S., Tsukamoto T. Small polaron of β -FeSi₂ obtained from optical measurements // *Thin Solid Films* - vol. 381- issue 2 – 2001 - C. 251-255.
42. Kakemoto H., Higuchi T., Makita Y., Sakuragi S., Kino Y., Tsukamoto T., Shin S. Magnetic property and electronic structure of β -FeSi₂ // *Physica B: Condensed Matter* - vol. 281-282 - 2000 - C. 638-640.
43. Kakemoto H., Higuchi T., Makita Y., Kino Y., Tsukamoto T., Shin S., Satoshi W., Tsurumi T. Electronic structure of β -FeSi₂ obtained by maximum entropy method and photoemission spectroscopy // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* - vol. 199 - 2003 – C. 411-415.
44. Makita Y., Nakayama Y., Fukuzawa Y., Wang S.N., Ootogawa N., Suzuki Y., Liu Z.X., Osamura M., Ootsuka T., Mise T., Tanoue H. Important research targets to be explored for β -FeSi₂ device making // *Thin Solid Films* - vol. 461- issue 1 – 2004 - C. 202-208.

45. Liu Z.X., Wang S.N., Ootogawa N., Suzuki Y., Osamura M., Fukuzawa Y., Ootsuka T., Nakayama Y., Tanoue H., Makita Y. A thin-film solar cell of high-quality β -FeSi₂/Si heterojunction prepared by sputtering // *Solar Energy Materials and Solar Cells* - vol. 90- issue 3 – 2006 - C. 276-282.
46. Dalapati G.K., Liew S.L., Wong A.S.W., Chai Y., Chiam S.Y., Chi D.Z. Photovoltaic characteristics of p- β -FeSi₂(Al)/n-Si(100) heterojunction solar cells and the effects of interfacial engineering // *Applied Physics Letters* - vol. 98 - issue 1 - 2011 - C. 013507(3).
47. Poruba A., Springer J., Mullerova L., Beitlerova A., Vanecek M., Wyrsh N., Shah A. Temperature dependence of the optical absorption coefficient of microcrystalline silicon // *Journal of Non-Crystalline Solids* - vol. 338-340 - issue 1 - 2004 - C 222-227.
48. Morooka H., Yamada H., Nashi K. - US Patent 6949463B2 – 2005 - Method of making iron silicide and method of making photoelectric transducer.
9. Hunt T.D., Reeson K.J., Homewood K.P., Teon S.W., Gwilliam R.M., Sealy B.J. Optical properties and phase transformations in α and β iron disilicide layers // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* - vol. 84 - issue 2 – 1994 – C. 168-171.
10. Z. Yang, K.P. Homewood, M. Finney, M. Harry, K.J. Resson Optical absorption study of ion beam synthesized polycrystalline semiconducting FeSi₂ // *Journal of Applied Physics* – vol. 78 – 1995 – C. 1958-1963.
11. Libezny M., Poortmans J., Vermeulen T., Nijs J., Amesz P. H., Herz K., Powalla M., Reinsperger G.-U., Schmidt M., Hoffmann V., Lange H. // *Processing. 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice, France* – 1995 – C. 1326-1329
12. T.B. Massalsky (Ed.) *Binary Alloy Phase Diagram* – ASM: American Society for Metals. - 1986 – C. 2224.
13. Leong D. N., Harry M. A., Reeson K., Homewood K. P. A silicon/iron-disilicide lightemitting diode operating at a wavelength of 1.5 μ m // *Nature* – 1997 - vol. 387 - C. 686-688.
14. Lourenço M.A., Butler T.M., Kewell A.K., Gwilliam R.M., Kirkby K.J., Homewood K.P. Electrical, electronic and optical characterisation of ion beam synthesised β -FeSi₂ light emitting devices // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* - vol. 175-177 - issue 1 - 2001 - C 159-163.
15. Sun C.M., Tsang H.K., Wong S.P., Cheung W.Y., Ke N., Lourenço M.A., Homewood K.P. Electroluminescence from metal-oxide-silicon tunneling diode with ion-beam-synthesized β -FeSi₂ precipitates embedded in the active region // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* - vol. 267 - issue 7 - 2009 - C 1081-1084.
16. Sze S.M., Ng K. K. *Physics of Semiconductor Devices*. - 3rd Edition - John Wiley and Sons, Inc. - 2007 - C. 832.
17. Suemasu T., Negishi Y., Takakura K., Hasegawa F. Room temperature 1.6 μ m electroluminescence from a Si-based light emitting diode with β -FeSi₂ active region // *Japanese Journal of Applied Physics* - vol. 39 - Part 2 - Number 10B - 2000 - C L1013- L1015.
18. Suemasu T., Negishi Y., Takakura K., Hasegawa F., Chikyow T. Influence of Si growth temperature for embedding β -FeSi₂ and resultant strain in β -FeSi₂ on light emission from p-Si/ β -FeSi₂ particles/n-Si light-emitting diodes // *Applied Physics Letters* - vol. 79 – issue 12 – 2001 –C 1804-1806.

References

1. Derrien J., Chevrier J., Vinh L.T., Mahan J.E. Semiconducting silicide-silicon heterostructures: growth, properties and applications // *Applied Surface Science* – vol. 56-58 - 1992 - C 382-393.
2. Reeson K.J., Sharpe J., Harry M., Leong D., McKinty C., Kewell A., Lourenco M., Chen Y.L., Shao G., Homewood K.P. Is there a future for semiconducting silicides? // *Microelectronic Engineering* – vol.50 – 2000 – C. 223-235.
3. Borisenko V.E. (Ed.) *Semiconducting silicides: basics, formation, properties* Springer-Verlag, Berlin, 2000 – C. 348.
4. Maex K. and van Rossum M. (Eds.), *Properties of metal silicides*, INSPEC, IEE, London, UK, 1995– C. 335.
5. Ivanenko L.I., Shaposhnikov V.L., Filonov A.B., Krivosheeva A.V., Borisenko V.E., Migas D.B., Miglio L., Behr G., Schumann J. Electronic properties of semiconducting silicides: fundamentals and recent predictions // *Thin Solid Films* - vol.461 - issue 1 - 2004 - C 141-147.
6. Bost M.C., Mahan J.E. Optical properties of semiconducting iron disilicide thin films // *Journal of Applied Physics* - vol.58 – issue 7 - 1985 – C. 2696-2703.
7. Bost M.C., Mahan J.E. A clarification of the index of refraction of betairon disilicide // *Journal of Applied Physics* – vol.64 – issue 4 - 1988 – C. 2034-2037.
8. Bost M.C., Mahan J.E. Semiconducting Silicides as Potential Materials for electro-optic VLSI interconnects // *Journal of Vacuum Science and*

19. Sunohara T., Li C., Ozawa Y., Suemasu T., Hasegawa F. Growth and characterization of Si-based light-emitting diode with β -FeSi₂-particles/Si multilayered active region by molecular beam epitaxy // *Japanese Journal of Applied Physics* - vol. 44 - Part 1 - Number 6A - 2005 - C 3951-3953.
20. Ozawa Y., Ohtsuka T., Li C., Suemasu T., Hasegawa F. Influence of β -FeSi₂ particle size and Si growth rate on 1.5 μ m photoluminescence from Si/ β -FeSi₂-particles/Si structures grown by molecular-beam epitaxy // *Journal of Applied Physics* - vol. 95 – issue 10 - 2004 - C. 5483-5486.
21. Han, M., Tanaka M., Takeguchi M., Zhang Q., Furuya K. High-resolution transmission electron microscopy study of interface structure and strain in epitaxial β -FeSi₂ on Si (111) substrate // *Journal of Applied Physics* - vol. 255 – issue 1-2 - 2003 - C. 93-101.
22. Shevlyagin A., Goroshko D.L., Chusovitin E.A., Galkin K. N., Galkin N.G. // Characterization of the silicon/ β -FeSi₂ nanocrystallites heterostructures for the NIR photodetection at low temperature // *Japanese Journal of Applied Physics* - vol. 54 – Number 7S2 – 2015 –C 07JB02 (4).
23. Галкин Н.Г., Горошко Д.Л., Чусовитин Е.А. Способ создания светозлучающего элемента - Патент на изобретение - №2485632 - опубл. 20.06.2013 - Бюллетень №17.
24. Izumi S., Shaban M., Promros N., Nomoto K., Yoshitake T. Near-infrared photodetection of β -FeSi₂/Si heterojunction photodiodes at low temperatures // *Applied Physics Letters* - vol. 102 – issue 3 – 2013 –C 032107(4).
25. Chu S.C., Hirohada T., Nakajima K., Kan H., Hiruma T. Room-temperature 1.56 μ m electroluminescence of highly oriented β -FeSi₂/Si single heterojunction prepared by magnetron-sputtering deposition // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 41 – Part 2 - Number 11A - 2002 –C L1200-L1202.
26. Chu S.C., Hirohada T., Kan H., Hiruma T. Electroluminescence and response characterization of β -FeSi₂-based light-emitting diodes // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 43 – Part 2 - Number 2A - 2004 – C L154-L156.
27. Takauji M., Li C., Suemasu T., Hasegawa F. Fabrication of p-Si/ β -FeSi₂/n-Si double-heterostructure light-emitting diode by molecular beam epitaxy // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 44 – Part 1 - Number 4S - 2005 – C. 2483-2486.
28. Ugajin Y., Takauji M., Suemasu T. Annealing temperature dependence of EL properties of Si/ β -FeSi₂/Si (111) double-heterostructures light-emitting diodes // *Thin Solid Films* - vol. 508 – issue 1-2 - 2006 - C. 376-379.
29. Ugajin Y., Sunohara T., Suemasu T. Investigation of current injection in β -FeSi₂/Si double-heterostructures light-emitting diodes by molecular beam epitaxy // *Thin Solid Films* - vol. 515 - issue -22 – 2007 - C. 8136-8139.
30. M. Suzuno, S. Murase, T. Koizumi, T. Suemasu, Improved Room-Temperature 1.6 μ m Electroluminescence from p-Si/ β -FeSi₂/n-Si Double Heterostructures Light-Emitting Diodes // *Applied Physics Express* - vol. 1 - Number 2-2008 – C. 021403(3).
31. Suzuno M., Koizumi T., Suemasu T. p-Si/ β -FeSi₂/n-Si double-heterostructure light-emitting diodes achieving 1.6 μ m electroluminescence of 0.4 mW at room temperature // *Applied Physics Letters* - vol. 94 - issue 21 - 2009 – C. 213509(3).
32. Murase S., Sunohara T., Suemasu T. Epitaxial growth and luminescence characterization of Si/ β -FeSi₂/Si multilayered structures by molecular beam epitaxy // *Journal of Crystal Growth* - vol. 301-302 – issue 1 - 2007 - C. 676-679.
33. Koizumi T., Murase S., Suzuno M., Suemasu T. Room-temperature 1.6 μ m electroluminescence from p⁺-Si/ β -FeSi₂/n⁺-Si diodes on Si(001) without high-temperature annealing // *Applied Physics Express* - vol. 1 - Number 5- 2008 – C. 051405(3).
34. Suzuno M., Koizumi T., Kawakami H., Suemasu T. Enhanced room-temperature 1.6 μ m electroluminescence from Si-based double-heterostructure light-emitting diodes using iron disilicide // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 49 - Number 4S - 2010 – C. 04DG16(4).
35. Dalla Betta G.F. (Ed.) *Advances in Photodiodes – InTech*. - 2011- C. 478.
36. Shaban M., Nomoto K., Izumi S., Yoshitake T. Characterization of near-infrared n-type β -FeSi₂/p-type Si heterojunction photodiodes at room temperature // *Applied Physics Letters* - vol. 94 – issue 22 – 2009 –C. 222113(4).
37. Shaban M.; Izumi S.; Nomoto K. Yoshitake T. n-type-FeSi₂/intrinsic-Si/p-type Si heterojunction photodiodes for near-infrared light detection at room temperature // *Applied Physics Letters* - vol. 95 - issue 16 - 2009 - C 162102(4).
38. N. Galkin, E. Chusovitin, T. Shamirsaev, A. Gutakovski, A. Latyshev Growth, structure and luminescence properties of multilayer Si/ β -FeSi₂ NCs/Si/.../Si nanoheterostructures // *Thin Solid Films* - vol. 519- issue 24 – 2011 - C. 8480–8484.
39. Shevlyagin A., Goroshko D., Chusovitin E., Galkin K., Galkin N. Characterization of the silicon/ β -FeSi₂ nanocrystallites heterostructures for the NIR photodetection at low temperature // *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 54 - Number 7S2 - 2015 - C 07JB02 (4).

40. Kakemoto H., Makita Y., Sakuragi S., Tsukamoto T. Synthesis and properties of semiconducting iron disilicide β -FeSi₂ // Japanese Journal of Applied Physics vol. 38 – Part 1 - Number 9A - 1999 - C 5192-5199.
41. Kakemoto H., Makita Y., Kino Y., Sakuragi S., Tsukamoto T. Small polaron of β -FeSi₂ obtained from optical measurements // Thin Solid Films - vol. 381- issue 2 – 2001 - C. 251-255
42. Kakemoto H., Higuchi T., Makita Y., Sakuragi S., Kino Y., Tsukamoto T., Shin S. Magnetic property and electronic structure of β -FeSi₂ // Physica B : Condensed Matter - vol. 281-282 - 2000 - C. 638-640.
43. Kakemoto H., Higuchi T., Makita Y., Kino Y., Tsukamoto T., Shin S., Satoshi W., Tsurumi T. Electronic structure of β -FeSi₂ obtained by maximum entropy method and photoemission spectroscopy // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B - vol. 199 - 2003 – C. 411-415.
44. Makita Y., Nakayama Y., Fukuzawa Y., Wang S.N., Otagawa N., Suzuki Y., Liu Z.X., Osamura M., Ootsuka T., Mise T., Tanoue H. Important research targets to be explored for β -FeSi₂ device making // Thin Solid Films - vol. 461- issue 1 – 2004 - C. 202-208.
45. Liu Z.X., Wang S.N., Otagawa N., Suzuki Y., Osamura M., Fukuzawa Y., Ootsuka T., Nakayama Y., Tanoue H., Makita Y. A thin-film solar cell of high-quality β -FeSi₂/Si heterojunction prepared by sputtering // Solar Energy Materials and Solar Cells - vol. 90- issue 3 – 2006 - C. 276-282.
46. Dalapati G.K., Liew S.L., Wong A.S.W., Chai Y., Chiam S.Y., Chi D.Z. Photovoltaic characteristics of p- β -FeSi₂(Al)/n-Si(100) heterojunction solar cells and the effects of interfacial engineering // Applied Physics Letters - vol. 98 - issue 1 - 2011 - C 013507(3).
47. Poruba A., Springer J., Mullerova L., Beitlerova A., Vanecek M., Wyrsh N., Shah A. Temperature dependence of the optical absorption coefficient of microcrystalline silicon // Journal of Non-Crystalline Solids - vol. 338-340 - issue 1 - 2004 - C 222-227.
48. Morooka H., Yamada H., Nashi K. - US Patent 6949463B2 – 2005 - Method of making iron silicide and method of making photoelectric transducer.