

Заключение

Показано, что наночастицы металлов в PG7, за исключением Hg (которая не смачивает стекло), образуют дендритные структуры с дифракционным размером несколько больше, чем средний диаметр пор. Обнаружено сильное подавление оптических мод для Sn+PG7 в интерфейсном слое. Показано, что плотность фоновых состояний наночастиц свинца и олова увеличивается как в области как низких, так и высоких энергий. Эти эффекты связаны с нарушением симметрии на поверхности и со взаимодействием с самой матрицей. Определены величины сдвигов рентгеновских $K_{\alpha 1}$ линий для наночастиц In и Pd.

1. Lee, M.K., Tien, C., Charnaya, E.V., Sheu, H.-S., Kumzerov, Y.A. Structural variations in nanosized confined gallium // Phys. Lett. A. – 2010. – V. 374. – P. 1570-1573.

2. Chattopadhyay, P.P., Nambissan, P.M.G., Pabi, S.K., Manna, I. Polymorphic bcc to fcc transformation of nanocrystalline niobium studied by positron annihilation // Phys. Rev. B. – 2001. – V. 63. – P. 054107 (7p.).

3. Balamurugan, B., Kruijs, F.E., Shivaprasad, S.M., Dmitrieva, O., Záhres, H. Size-induced stability and structural transition in monodispersed indium nanoparticles // Appl. Phys. Lett. – 2005. – V. 86. – P. 083102 (3p).

4. Паршин, П.П., Землянов, М.Г., Панова, Г.Х., Шиков, А.А., Набережнов, А.А., Кумзеров, Ю.А., Голосовский, И.В., Иванов, А.С. Особенности атомной динамики свинца, внедренного в нанометровые поры стекла // ЖЭТФ. – 2010. – Т. 138, № 6. – С. 1127-1134.

5. Паршин, П.П., Землянов, М.Г., Панова, Г.Х., Шиков, А.А., Кумзеров, Ю.А., Набережнов, А.А., Сергеев, И., Strichon, W., Чумаков, А.И., Ruffer, R. Атомная динамика нанометровых частиц олова, внедренного в пористое стекло // ЖЭТФ. – 2012. – Т. 141, № 3. – С. 502-514.

6. Derlet, P.M., Meyer, R., Lewis, L.J., Stuhr, U., Van Swygenhoven, H. Low-frequency vibrational properties of nanocrystalline materials // Phys. Rev. Lett. – 2001. – V. 87, № 20. – P. 205501-205501 (4p.).

7. Kara, A., Rahman, T.S. Vibrational Properties of metallic nanocrystals // Phys. Rev. Lett. – 1998. – V. 81, № 7. – P. 1453-1456.

8. Meyer, R., Prakash, S., P. Entel P. Capillary pressure and phonons in Ag, Au, Cu and Ni nanoparticles // Phase Trans. – 2002. – V. 75, № 1-2. – P. 51-58.

9. Derlet, P.M., Van Swygenhoven, H. High-frequency vibrational properties of metallic nanocrystalline grain boundaries // Phys. Rev. Lett. – 2004. – V. 92, № 3. – P. 035505 (4p.).

УДК 621.3383.52 / 621.327.2

Н.Г. Галкин

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ КРЕМНИЕВОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОНИКИ С ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ НА 1.5 МКМ

Рассмотрены основные подходы к реализации гибридных (ГЭФ ИС) и монокристаллических (МЭФ ИС) электрон-фотонных интегральных микросхем с оптической связью на основе кремниевых подложек и показаны основные достижения в этих направлениях. Развита основа кремний-силицидного подхода для создания кремниевых МЭФ ИС с оптической связью на длине волны 1.5 мкм. Показано, что возможно использовать одну и ту же p-i-n диодную структуру с активным слоем из встроенных нанокристаллов (НК) $\beta\text{-FeSi}_2$ с минимальной толщиной кремниевых прослоек в i-слое в качестве светодиода (СД), фотодиода (ФД) и оптического модулятора при их работе при разных значениях прямого и обратных смещений.

Ключевые слова: микросхемы, оптическая связь, кремний, дисилицид железа, нанокристаллы, гетерозпитаксия, фотодиоды, светодиоды.

THE PROSPECTS OF DESIGN AND DEVELOPMENT OF THE SILICON INTEGRATED PHOTONICS WITH OPTICAL INTERCONNECT AT 1.5 MICRONS

The basic approaches for realization of hybrid (HEP IC) and monolithic (MEP IC) electron-photonic integrated circuits have been observed and majority achievements in these directions have been shown. The basics of silicon-silicide approach for creation of silicon monolithic electron-photonic integrated circuits (Si MEP IC) with optical interconnect at a wave length of 1.5 microns have been developed. It was shown that it is possible to use the same p-i-n diode structure with active layer of embedded β -FeSi₂ nanocrystals (NC) with a minimum silicon thickness of interlayers in the i-type layer as a light emitting diode (LED), photodiode (PD) and optical modulator with their work at different values of direct and reverse biases.

Key words: integrated circuits, optical interconnects, silicon, iron disilicide, nanocrystals, heteroepitaxy, photodiodes, light emitting diodes.

Обзор работ подготовлен при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 16-19-10241. Основные экспериментальные работы выполнены сотрудниками лаборатории оптики и электрофизики ИАПУ ДВО РАН (д.ф.-м.н. Д.Л. Горошко, к.ф.-м.н. Е.А. Чусовитиным, к.ф.-м.н. К.Н. Галкиным, к.ф.-м.н. С.А. Доценко и инженером А.В. Шевлягиным).

Развитие современной планарной микроэлектроники и оптической проекционной литографии привело в начале 2017 г. к выпуску интегральных схем (ИС) памяти (SRAM) и микропроцессоров по 10 нм технологическому процессу, с последующим уменьшением минимального размера до 7 нм в 2019-2020 гг. и в перспективе к 2023 г. – до 5 нм по планам известных фирм Intel и Samsung. «Закон Мура» к тому времени не будет выполняться.

Основные проблемы в ИС с минимальными технологическими размерами от 7 нм до 5 нм при сохранении транзисторной парадигмы развития микроэлектроники и переходе в ближайшие годы к фотолитографии экстремального ультрафиолета с длиной волны 13-14 нм будут существовать. Эти проблемы следующие: 1) рост сопротивления мультислойной (до 11 слоев и более) металлизации в ИС; 2) рост емкости межсоединений в ИС, которые приведут к увеличению резистивных потерь и только к незначительному увеличению быстродействия.

Проблемы резистивных потерь, существенного увеличения быстродействия и уменьшения потребляемой мощности могут быть решены путем полного перехода к технологии оптической связи между электронными блоками в ИС в рамках основной планарной КМОП-технологии, поскольку приборы фотоники не имеют ограничений по скорости и по потере энергии в сравнении с обычными электронными ИС. Соединение активных и пассивных электрических элементов в ИС с лазерами или светодиодами, модуляторами, усилителями и сетью оптических волноводов на одном кристалле в рамках планарного технологического процесса будет являться монолитной электронно-фотонной интегральной схемой (МЭФ ИС).

Основные элементы в электронно-фотонных интегральных микросхемах: лазер или светодиод с высокой интенсивностью (с длиной волны 1.5 мкм) для передачи сигнала между блоками, оптический модулятор с малой площадью и минимальным потреблением энергии и фотодиод со спектральной чувствительностью до 2.5 мкм.

В статье рассмотрены основные параметры современных лазеров, светодиодов и фотодиодов в интегральном исполнении, выращенных на кремниевых подложках:

лазер на квантовых точках в системе InAs/GaAs с электрической накачкой на Si подложке [1];

интегрированный перестраиваемый микрокольцевой лазер на КНИ подложке [2];

гибридный фосфид индия-на-кремнии лазерный диод [3];

линейка InP лазеров с распределенной обратной связью, выращенных прямо на Si-подложке и работающих при комнатной температуре [4];

кремниевые фотодиоды на диапазон до 1.7 мкм в интегральном исполнении [5];

микроструктуры с захватом фотонов, обеспечивающие создание высокоскоростных и высокоэффективных кремниевых фотодиодов [6].

Рассмотрены современные кремниевые монолитные оптические модуляторы, реализованные по КМОП-технологии:

кремниевые оптические модуляторы, работающие на плазменно-дисперсионном эффекте [7]; представлены три типа оптических модуляторов с аккумуляцией носителей, с инжекцией носителей и обеднением носителей.

Рассмотрены реализованные подходы к созданию гибридных кремниевых электрон-фотонных интегральных схем с излучателями на соединениях A_3B_5 :

гибридные монолитные электрон-фотонные интегральные схемы по технологии прямого сращивания Si и GaAs ИС [8];

гибридные монолитные электрон-фотонные интегральные схемы на основе соединений A_3B_5 на кремнии [8];

кремниевые электрон-фотонные интегральные схемы с различным типом прямого сращивания кристаллов [8];

электрон-фотонная система на чипе или подход с нулевыми изменениями [9];

однокристалльный оптический приемопередатчик, основанный на монолитном вертикальном фотонном приборе ввода/вывода [10].

Проведен анализ достоинств и недостатков современных подходов к созданию гибридных кремниевых электрон-фотонных интегральных схем с излучателями на прямозонных полупроводниках.

Предложен оригинальный подход для создания основ кремний-силицидной интегральной фотоники на базе кремниевых p-n переходов со встроенными в p- или i-слой мультислоями наноразмерных кристаллов (НК) β -FeSi₂, оцениваются достигнутые параметры светодиодов и фотодетекторов на диапазон 1.3-1.8 мкм и перспективы реализации оптической связи между транзисторами в кремниевой монолитной электрон-фотонной интегральной схеме [12, 13].

Нанокристаллы (НК) β -FeSi₂ формировались на подложках Si(111) методом твердофазной эпитаксии (ТФЭ) 0.4 нм Fe при температуре 630°C в сверхвысоковакуумной камере VARIAN с базовым давлением $2 \cdot 10^{-9}$ Торр с последующей молекулярно-лучевой эпитаксией кремния (МЛЭ) тонкого (10-15 нм) слабелегированного ($N_a = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) кремниевого слоя p-типа проводимости при температуре 750°C [11]. Для получения многослойных структур со встроенными НК этапы ТФЭ и МЛЭ повторялись 7-8 раз с толщиной кремниевых прослоек 10 нм. Формирование покрывающего слоя кремния выполнялось путем осаждения p⁺-слоя Si ($N_a = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) толщиной 200 нм при температуре 750°C для образования Si p-i-n структуры и обеспечения омического контактного слоя. После выгрузки из ростовой камеры образцы химически травились для формирования меза-диодов и последующих фотоспектральных и/или светоизлучающих свойств. По окончании травления слои Au-Sb и Al осаждались для формирования контактов с n-Si и p-Si, соответственно.

Измеренные при комнатной температуре и при нулевом смещении спектры фотоотклика выращенных структур показали, что встраивание только 7 слоев НК β -FeSi₂ в кремниевый p-n переход

привело к: 1) увеличению области спектральной чувствительности до 1600 нм (0.77 эВ); 2) увеличению более чем на два порядка по величине фототклика (R) в диапазоне телекоммуникационных (1.5-1.55 мкм) длин волн; 3) к десятикратному увеличению фототклика в диапазоне длин волн, близких к краю поглощения кремния (1.0-1.2 мкм), в результате встраивания НК β -FeSi₂.

В сформированном меза-диоде при нулевом смещении и комнатной температуре внешняя квантовая эффективность составила $\eta=0.2\%$ на длине волны 1.3 мкм. Относительно небольшой фототок объясняется малым количеством встроенных НК β -FeSi₂ и слабой генерацией в них электрон-дырочных пар. Использование структуры, близкой к p-i-n структуре, дало возможность умножить количество носителей при приложении обратного смещения, поскольку поглощение света в ближней ИК-области в НК β -FeSi₂ приводит к генерации носителей и их диффузии в кремний, вызывая развитие электронной лавины. Существование лавинного пробоя подтверждено экспоненциальным ростом фототклика при обратном смещении 50-60 В, что соответствует лавинному пробоя. В сформированном меза-диоде со встроенными НК получено напряжение пробоя 54В, чувствительность 45 мА/Вт и коэффициент усиления лавины, равный 5. Максимальная величина внешней квантовой эффективности, полученная в этих условиях, составляет около 7%.

На изготовленном меза-диоде со встроенными НК β -FeSi₂ и прослойками кремния (10-12 нм) был зарегистрирован спектр электролюминесценции (ЭЛ) при комнатной температуре [12], который может быть разложен на два пика с максимумами при 0.814 эВ и 0.761 эВ с различными полуширинами (66 мэВ и 94 мэВ) и соотношением амплитуд, равным 3. В модели, предложенной ранее Маедой и др. [13], первый пик (А-зона люминесценции) определялся межзонными переходами в НК β -FeSi₂. Второй пик был отнесен к С-зоне, связанной с переходами между примесными состояниями в β -FeSi₂.

Анализ данных по структуре НК, их размеров и напряжений в них показал, что малые НК β -FeSi₂ остаются непрямозонным полупроводником с возможностью излучательной рекомбинации при участии фонона, а в НК больших размеров становится возможной прямозонная люминесценция с увеличенной вероятностью такого процесса. С учетом данных ВР ПЭМ [12], на поперечных срезах меньшее количество более крупных (20-25 нм) НК β -FeSi₂ вносит больший вклад в электролюминесценцию за счет реализации прямого излучательного перехода в НК, чем более плотный массив квантово-размерных (5-6 нм) НК β -FeSi₂ с большей энергией расщепления.

Заключение

1. Анализ литературы показал, что на середину 2017 г. существовали два новых фундаментальных подхода для создания электрон-фотонных интегральных схем: гибридный и монолитный, использующий технологию прямого сращивания пластин.

2. Первый гибридный подход – «подход с нулевыми изменениями» – планируется для осуществления оптической связи между микропроцессором и оперативной памятью. Авторы использовали рост Si-Ge фотодиодов на КНИ-подложках в качестве фотодетекторов, встроенный лазер с длиной волны 1.183 мкм, используя кремний как волновод, ограниченный окислом, вводят оптический модулятор (кремниевый микрокольцевой резонатор), усилитель, систему дифракционных решеток для сопряжения с внешним волноводом. Интегрированный чип содержит 70 миллионов транзисторов и 850 оптических компонентов в одной гибридной электрон-фотонной интегральной микросхеме. Основные недостатки данного подхода: 1) внешний лазер; 2) волноводный чип-соединитель через вертикальный решеточный соединитель; 3) селективное травление кремниевой подложки под областями с оптическими приборами; 4) дополнительные внешние лазеры для мультиволновых оптических схем и переход на длину волны до 1550 нм.

3. Монолитный подход использует рост лазерных структур на GaAs подложках и локальный рост Ge на Si подложке для создания Ge-Si фотодетекторов. Далее лазерная структура отделяется от GaAs подложки и сращивается с окисленной Si подложкой в специально вскрытых оксидных окнах размерами 32-40 мкм. Для осуществления оптической связи используется вывод оптического излучения с длиной волны 850 нм от встроенного лазера через оптоволокно в Ge-Si фотодетектор. Если используется лазер с длиной волны 1550 нм, то предполагается прямое сращивание таким образом, чтобы передача излучения осуществлялась прямо в фотодетектор через слой SiO₂ или через кремниевую подложку. Метод с малой степенью интеграции был протестирован без оптической связи с электрическими элементами обычной ИС. Это обеспечивает быстроедействие лазерной линии до 20 Гбит/сек. Основные недостатки этого подхода: сращивание СД-структуры в локальной площади подложки достаточно сложное и не может обеспечить высокую степень интеграции. Это дорогая технология для 3D-интеграции, сильно увеличивающая цену ИМС-продуктов с оптической связью.

4. Разработан оригинальный кремний-силицидный подход для монолитных электрон-фотонных интегральных схем: возможно использование одной и той же структуры с активным слоем из встроенных НК β -FeSi₂ с минимальной толщиной кремниевых прослоек в качестве СД, ФД и оптического модулятора, работающих в разных режимах. Предлагается исключить интегрированные в КМЭФ ИС элементы модуляторов интенсивности оптического луча на 1.5 мкм, а для этого использовать модуляцию чувствительности фотодиода при переходе с режима малого обратного смещения (логический «0») на режим лавинного пробоя (логическая «1»), при котором реализуется квантово-размерный эффект Штарка при неизменной оптической мощности СД. Для осуществления оптической связи можно использовать ориентированное сращивание подложек через слой диоксида кремния без использования усилителя. Для увеличения квантовой эффективности ФД и СД на структурах со встроенными НК β -FeSi₂ предполагается увеличить плотность НК, количество слоев, оптимизировать их размеры (15-20 нм) и конструкцию Si p-i-n диодов.

-
1. Electrically pumped continuous-wave III-V quantum dot lasers on silicon / S. Chen, et al. // *Nature Photonics*. – 2016. – V. 10, № 5. – P. 307-311.
 2. Liang, D., Xuang, X., Kurczveil, G., Fiorentino, M., Beausoleil, R.G. Integrated finely tunable microring laser on silicon // *Nature Photonics*. – 2016. – V. 10, № 11. – P. 719-722.
 3. Hybrid indium phosphide-on-silicon nanolaser diode / G. Crosnier, et al. // *Nature Photonics*. – 2017. – V. 11, № 5. – P. 297-300.
 4. Room-temperature InP distributed feedback laser array directly grown on silicon / Z. Wang, et al. // *Nature Photonics*. – 2015. – V. 9, № 12. – P. 837-842.
 5. High-speed detection at two micrometers with monolithic silicon photodiode / J.J. Ackert, et al. // *Nature Photonics*. – 2015. – V. 9, № 6. – P. 393-397.
 6. Photon-trapping microstructures enable high-speed high-efficiency silicon photodiodes / Y.Gao, et al. // *Nature Photonics*. – 2017. – V. 11, № 5. – P. 301-308.
 7. Read, G.T., Mashnovich, G., Gardes, F.Y., Tomson, D.J. Silicon optical modulators // *Nature Photonics*. – 2010. – V. 4, № 8. – P. 518-526.
 8. *Topics in Applied Physics. Silicon Photonics* / eds.: L. Pavesi, D.J. Lockwood. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. – V. 91. – P. 1-162.
 9. Single-chip microprocessor that communicates directly using light / C. Sun, et al. // *Scientific Reports*. – 2015. – V. 5. – P. 16588.
 10. Single-chip photonic transiver based on bulk-silicon, as a chip-level photonic I/O platform for optical interconnects / G. Kim et al. // *Scientific Reports*. – 2015. – V. 5. – P. 11329.
 11. Enhancement of the Si p-n diode NIR photoresponse by embedding β -FeSi₂ nanocrystallites / A.V. Shevlyagin, et al. // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. P. 14795 (1-8).
 12. A room-temperature-operated Si LED with β -FeSi₂ nanocrystals in active layer: μ W emission power at 1.5 μ m / A.V. Shevlyagin., et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2017. – V. 121. – P. 113101 (1-9).
 13. Maeda, Y., Terai, Y., Itakura, M., Kuwano N. Photoluminescence properties of ion beam synthesized β -FeSi₂ // *Thin Solid Films*. – 2004. – V. 461. – P. 160-164.