

УДК 538.911, 539.25

Комаров Ф. Ф.¹, Власукова Л. А.², Мильчанин О. В.¹, Пархоменко И. Н.²,
Романов И. А.², Мудрый А. В.³, Wendler E.⁴, Żuk J.⁵

ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ В ТЕХНОЛОГИЯХ КРЕМНИЕВОЙ ФОТОНИКИ

¹Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

³Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
Минск, Республика Беларусь

⁴Friedrich- Schiller- University, Jena, Germany

⁵Maria Curie- Sklodowska University, Lublin, Poland

В работе рассмотрены результаты исследований по созданию светоизлучающих и фотоприемных приборов УФ -, видимого- и ближнего ИК- диапазонов на кремнии и по кремниевой технологии

Кремний является основным полупроводниковым материалом, используемым для производства интегральных микросхем, и занимает доминирующее положение на рынке с долей около 90%. Кремниевые чипы с ультравысоким уровнем интеграции образуют основу современной микроэлектроники и обеспечивают экспоненциальный рост производительности вычислительной техники. В настоящий момент вклад межсоединений в общее время задержки на логических элементах сопоставим или даже превышает время переключения транзисторов. Наиболее многообещающим решением проблемы увеличения быстродействия будущих интегральных схем является оптическая передача данных внутри Si кристалла. Оптические межсоединения обеспечивают скорость передачи данных ~ 30 - 60 Гбит/с, предел медной технологии оценивается в 20 Гбит/с. Фундаментальной проблемой, однако, является то, что кремний – непрямозонный полупроводник и, вследствие этого, имеет низкую квантовую эффективность межзонной излучательной рекомбинации. В последние годы специалисты в области микро- и оптоэлектроники усиленно работают над разработкой высокоэффективных излучателей в ближней-, средней-ИК и видимой области, волноводов, модуляторов и приемников излучения на кремнии, создание которых позволило бы объединить электронные и оптические приборы в единой интегральной схеме.

Для создания светоизлучающей структуры на основе кремния в ИК области, а именно в области так называемых окон прозрачности стандартного оптического волокна (1,3 мкм и 1,5 мкм), разрабатывается несколько подходов, в рамках которых исследуются люминесценция кремния, легированного ионами редких земель, дислокационная люминесценция, люминесценция на иных дефектах структуры Si, а также краевая люминесценция монокристаллического сильнолегированного кремния. Другой интересный подход, разработанный нами и рядом других лабораторий мира, к решению проблемы создания источника ИК излучения, основан на создании нанокристаллов прямозонных, узкозонных полупроводников A^3B^5 (InAs, InSb, GaSb) в матрице кремния [1-3]. В этом случае спектральным положением длины волны излучения и интенсивностью свечения можно управлять путем изменения размеров и плотности распределения нанокристаллов. Эффективным способом создания массивов квантовых точек узкозонных полупроводников A^3B^5 в матрице кристаллического кремния является метод ионной имплантации с последующим отжигом. Данный метод полностью совместим с промышленной технологией микроэлектроники.

Основой для создания люминесцентных соединений УФ и видимого диапазона выступают различные вещества, однако наиболее перспективными являются структуры A^2B^6 . Большинство полупроводников A^2B^6 являются прямозонными, что усиливает их люминесцентные свойства и расширяет область применения. Сочетание высокой вероятности излучательных переходов в диапазоне длин волн от 320 до 830 нм и высокой подвижности носителей заряда позволяет использовать прямозонные полупроводники A^2B^6 (в том числе напри-

мер, ZnO, ZnSe, ZnS) [4-6] для получения источников и приемников излучения в видимом и УФ диапазоне, для создания светодиодов на квантовых точках, солнечных элементов, а также для изготовления элементов различных оптических приборов и устройств, применяемых в биологии, военной сфере и медицине.

Особого внимания заслуживают уже созданные нами структуры типа Zn-ядро/ZnO-оболочка в SiO₂, которые представляют интерес из-за гетеропереходов на границе раздела Zn/ZnO [4]. Наноструктуры Zn/ZnO демонстрируют явное снижение поверхностного плазмонного резонанса цинка и значительное увеличение видимой фотолюминесценции от ZnO оболочки. Такая особенность наноструктур типа Zn-ядро/ZnO-оболочка повышает их квантовую эффективность по сравнению с ZnO нанокластерами или тонкими пленками этого соединения, и делает их перспективными для создания синих и белых светодиодов, для применения в дисплеях на квантовых точках (QLED), для создания флуоресцентных меток и ряда других оптоэлектронных применений.

Для синтеза наноструктур на основе соединений A²B⁶ используем ионную имплантацию с последующими термообработками. Преимуществом этого метода является полная совместимость с современной кремниевой технологией. Метод ионной имплантации обеспечивает точную дозировку вводимой примеси, высокую чистоту и пространственную локальность.

Реализация оптоэлектронной пары (излучатель – приемник) требует также создания эффективного широкополосного кремниевого фотоприемника. В интегрированных приборах кремниевой фотоники детекторы должны обладать способностью регистрировать фотоны с энергией меньше, чем ширина запрещенной зоны (E_g) Si (1,12 эВ или с длиной волны более, чем 1,1 мкм), которые могут эффективно распространяться с минимумом потерь внутри оптоволоконна или иных волноводных сред. Кремниевые фотодетекторы нечувствительны к трем основным полосам оптоволоконных телекоммуникационных систем: S (1460 - 1530) нм, C (1530 - 1565) нм и L (1565 - 1625) нм. Для решения данных проблем ведется активный поиск недорогих и эффективных ИК-фотодетекторов, совместимых с кремниевой КМОП-технологией.

Нами [7,8] и в ряде ведущих лабораторий мира микро- и оптоэлектронного профиля проводится разработка и исследование фотоприемников на принципах создания примесных подзон в запрещенной зоне Si путем введения примесей, создающих глубокие уровни (рисунок 1). Как показано, такие фотоприемники ближнего и среднего ИК-диапазонов способны эффективно работать при комнатных температурах.

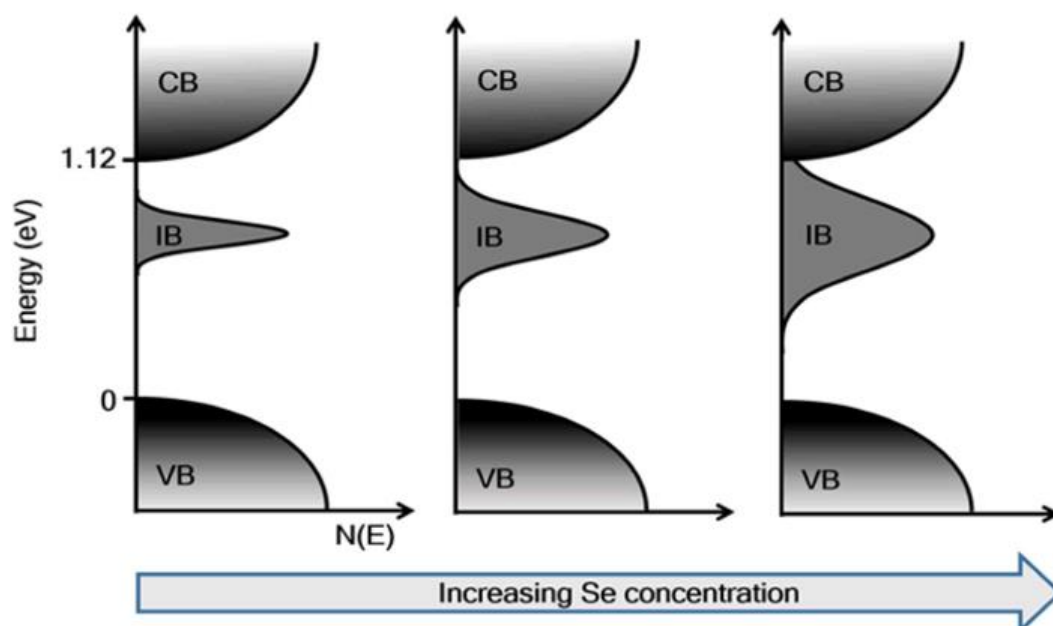


Рисунок 1 – Схематическое изображение плотности состояний в запрещенной зоне кремния, пересыщенного селеном

Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Установлено, что наибольший коэффициент поглощения света в ИК-диапазоне при комнатной температуре ($\sim 10^4 \text{ см}^{-1}$) наблюдается у монокристаллического кремния, пересыщенного на 3-4 порядка концентрации атомами халькогенов (Se, Te) [7,8].

При этом концентрация свободных электронов линейно возрастает с увеличением концентрации примеси, а доля электрически активированной примеси (находящейся в узлах решётки Si) остаётся практически неизменной. Показано, что Si, гиперпересыщенный теллуrom, остаётся стабильным после термообработки при 400 – 500 °С в течение 10 - 20 минут [8]. Следовательно, такой материал может быть использован в рамках современной планарной КМОП технологии производства микросхем.

Список литературы

1. Ion- beam synthesis of InAs nanocrystals in crystalline silicon / F. F. Komarov [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.-2008. - Vol. B 266, № 16- P. 3557-3564.
2. Structure and optical properties of silicon layers with GaSb nanocrystals created by ion-beam synthesis / F. F. Komarov [et al.] // Physica Status Solidi. - 2012.- Vol. 209 A, № 1.- P. 148-152
3. Optical and structural properties of silicon with ion- beam synthesized InSb nanocrystals / F. F. Komarov [et al.] // J. Appl. Spectr. - 2017. - Vol. 83, № 6 - P. 959-964.
4. Luminescence of ZnO nanocrystals in silica synthesized by dual (Zn, O) implantation and thermal annealing / I. N. Parkhomenko [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys.-2021. - Vol. 54. - P. 265104 (9 pp).
5. Radiative recombination in zinc blende ZnSe nanocrystals ion – beam synthesized in silica / I. N. Parkhomenko [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys.-2022. - Vol. 55 (20). - P. 205101 (8 pp).
6. Raman monitoring of ZnSe and $\text{ZnS}_x\text{Se}_{1-x}$ nanocrystals formed in SiO_2 by ion implantation / M. Makhavikou [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.-2018. - Vol. B 435. - P. 3557-3564.
7. Structural and optical properties of Si hyperdoped with Te by ion implantation and pulsed laser annealing / F. F. Komarov [et al.] // Vacuum. – 2020. – Vol. 178. – P. 109434 (6 pp).
8. Te- hyperdoped silicon layers for visible- to- infrared photodiodes / F.F. Komarov [et al.] // Technical Physics. – 2022. – Vol. 67, № 15. – P. 2448-2458.