РАСШИРЕНИЕ СПЕКТРА ЭФФЕКТИВНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА

Т. А. Джалалов, Э.З.Имамов, Р.А.Муминов, Х.Н.Каримов

Ишда нокристал ярим ўтказгич асосида қуёш элементи яратиш имконияти тадқиқ этилган. Нано-киритмалар моддаси танловини белгилайдиган параметрлар аниқланди. Кремний тадқиқига нанокластерлар ўсишини таъминловчи физик жараёнлар ўрганилди. Заряд ташувчилар термолизацияси муаммосида фонон ва фонон таъсирлашувининг роли аниқланди, шунингдек, заряд ташувчилар термолизациясининг оқибатлари ўрганилди.

***Калит сўзлар**: яримўтказгич, нанокластер, фонон, қуёш элементи, термализация*

В работе исследованы возможности применения некристаллического полупроводника в качестве подложки солнечного элемента. Рассмотрена физика роста нанокластеров на кремниевой подложке. Определена роль фононов и фононного взаимодействия в проблеме термализации носителей заряда, а также исследованы её последствия.

***Ключевые слова**: полупроводник, нанокластер, фонон, солнечный элемент, термализация*

The article investigates the possibility of using non-crystalline semiconductor as a solar cell substrate. Parameters defining the selection of the material of inclusions were determined. The physics of growth of nanoclusters on a silicon substrate is considered. The role of phonons and phonon interaction in the problem of charge carrier thermalization is determined, as well as the consequences of thermalization of charge carriers.

***Key words**: semiconductor, nanocluster, phonon, solar cell, thermalization.*

Введение.

Длительное массовое преобразование солнечного излучения в электричество происходит в открытой среде, с изменяющимися климатическими и температурными режимами эксплуатации. Неизбежность длительного (полтора-два десятка лет) функционирования в столь экстремальных условиях требует от исследователей поиска принципиально новых средств и методов решения проблемы повышения эффективности преобразования солнечного излучения.

Эта деятельность, естественно, включает в себя совершенствование конструкции самого преобразователя, удешевление применяемых материалов, использование современных передовых технологий производства солнечных элементов (СЭ), в частности, достижений нанотехнологий. Кроме этих, исключительно технологических факторов повышения эффективности процесса преобразования солнечного излучения, задачу можно решать расширением спектра эффективного поглощения света. Только подобный комплексный подход может привести к качественному улучшению таких эксплуатационных параметров СЭ, как долговечность, устойчивость и стабильность функционирования.

Эффективность СЭ зависит не от всего спектра падающего и поглощенного солнечного излучения, а только от некоторой узкой его полосы, которая называется спектром эффективного поглощения света[1]. Ширина этой полосы определяется величиной ΔE_g - значением запрещенной зоны полупроводника.

Спектр эффективного поглощения света – это диапазон энергии солнечного излучения (***энергии фотонов***)***, вызывающий генерацию электричества***
Поглощение фотонов из этого диапазона ***сопровождается рождением*** электронно-дырочных пар, их ***разделением*** на электрон и дырку в контактном поле, а также ***переносом*** зарядов к соответствующим электродам.

[1] Для Si –солнечное излучение с энергией от 1,08 до ≈ 2 эВ [1]

Например, в кремнии спектр эффективного поглощения света в идеале[1] составляет 31,43% спектра общей интенсивности (см. в таблице выделенную часть).

Таблица

Спектральные характеристики солнечного излучения

Спектральный диапазон (эВ)	**0-0,5 (эВ)**	**0,5-1 (эВ)**	**1,0-1,5 (эВ)**	**1,5-2 (эВ)**	**2-2,5 (эВ)**	**2,5-3 (эВ)**	**3-3,5 (эВ)**	**3,5-4 (эВ)**	**4-4.5 (эВ)**	**4,5-5 (эВ)**	**>5(эВ)**
Спектр интенсивности в %	**6,43**		**64,29**				**27,14**				**2,14**
	6,43		**31,43**		**32,86**		**17,14**		**10,0**		**2,14**
	0,72	**5,71**	**13,57**	**17,86**	**17,86**	**15,0**	**10,0**	**7,14**	**5,71**	**4,29**	**2,14**
		ИК сдвиг		**УФ сдвиг**							

В Si кванты света с энергией $\hbar\omega$ выше 2 эВ рождают высоковозбужденные электронно-дырочные пары, которые предпочитают рекомбинировать и нагревать материал. А для квантов с энергией $\hbar\omega < \Delta E_g$ кремний оказывается практически прозрачным, так что ощутимого вклада в фотопроводимость они тоже не дают (ΔE_g = 1,08 эВ - ширина запрещенной зоны Si).

Если бы можно было вовлечь в среду эффективного поглощения света хотя бы еще два соседних интервала спектра (в таблице – заштрихованные части), то максимальная ширина спектра интенсивности, а вместе с ней и теоретический предел коэффициента полезного действия СЭ, увеличилась бы с 31,43% до 55% (ИК сдвиг 5,71%; УФ сдвиг – 17,86%). Оказывается, что подобную сослагательную постановку вопроса можно перевести в плоскость реального воплощения только при сочетании достижений двух современных бурно развивающихся технологий: технологию получения функциональных нано материалов и технологию полупроводниковых материалов для солнечных элементов.

В данной работе рассматриваются возможности и методы значительного повышения эффективности СЭ расширением спектра эффективного поглощения света в кремнии.

О возможности применения некристаллического полупроводника в качестве подложки СЭ

Под термином «некристаллический полупроводник» понимают любую макроскопическую конденсированную систему частиц, в расположении атомов которой отсутствует дальний порядок, то есть пространственное распределение атомов в неупорядоченном веществе не периодично.

Совокупность электрических и оптических экспериментов в неупорядоченных полупроводниках показывает, что феноменологические представления о разрешенных и запрещенных энергетических зонах, в известной мере, в них сохраняются. Например, как и в кристаллическом кремнии, коэффициент поглощения света в неупорядоченном веществе резко увеличивается при некоторой энергии, близкой к значению его запрещенной зоны. Существует аналогия и с температурной зависимостью статистической электропроводности в широком интервале температур.

Хотя подобные аналогии свойств кристаллических и некристаллических веществ оказываются далеко не полными, тем не менее, сходство именно оптических характеристик позволяет применить некристаллический кремний в качестве подложки солнечных элементов – устройств, исключительно предназначенных для преобразования в электричество поглощенной энергии солнечного излучения.

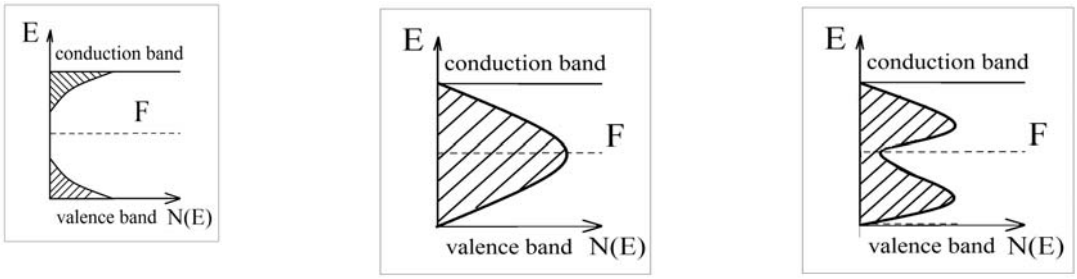
Поглощение света с частотой ниже пороговой связано с наличием хвостов плотности состояний в запрещенной зоне. Хвост плотности состояний представляет собой набор дискретных локализованных состояний, концентрация которых, как правило, оказывается довольно большой - до $10^{25} \div 10^{26}$ м$^{-3}$. Это естественная концентрация, не зависящая от специального легирования.

Однако, проявление тех или иных оптических особенностей некристаллического кремния существенно зависит от технологии его приготовления, что свидетельствует о наличии в образце всякого рода случайных структурных дефектов и, соответственно, случайных их полей. Эти поля приводят к возникновению в достаточно глубоких по-

[1] Без влияния земной атмосферы в вакууме, на экваторе, в зените

тенциальных ямах дискретных флуктуационных уровней, отвечающих локализованным состояниям электронов, глубина и координаты центров локализации которых представляют собой случайные величины. Именно через эти близко расположенные случайные локализованные состояния возможна реализация прыжковой проводимости носителей тока.

Отметим также, что уровни остаются дискретными даже при столь больших концентрациях и не происходит размытия этих уровней в зону: в силу случайности характера рассматриваемых уровней маловероятна их одновременная близость и в пространстве, и по энергиям. Эти условия необходимы были для реализации туннельных переходов электронов между центрами локализации (энергии должны быть равны, а расстояния между ними – малы). В итоге, тунелирования нет - хотя центров много и сохраняется дискретность уровней.



a). *b).* *c).*

Рис. Различные (a;b;c) немонотонные возможные формы зависимости плотности электронных состояний N(E) от энергии E в запрещенной зоне (локализованные состояния заштрихованы); F –уровень Ферми вдоль запрещенной зоны (штриховая линия)

Значения энергий ионизации уровней, будучи случайными, изменяются практически непрерывно в пределах целой энергетической полосы и даже могут заполнить всю запрещенную зону (или щель подвижности). На рисунке представлены несколько возможных типов распределений хвостов плотности состояний в запрещенной зоне.

Таким образом, большое сходство именно оптических характеристик кристаллического и некристаллического кремния реально позволяет рассматривать некристаллический объект в качестве возможного материала подложки солнечных элементов.

Параметры, определяющие выбор материала нановключений.

I. Большую роль в производстве твердотельной электроники играют слои и пленки, полученные методом молекулярно лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Эпитаксиальный рост позволяет выращивать пленки толщиной от нескольких атомных слоев до единиц микрометров, с квантовыми ямами, точками и др. Существуют различные механизмы эпитаксиального роста одного материала на поверхности другого. В работе рассматривается процесс эпитаксиального роста одиночных нановключений (или островковых нанокластеров) из халькогенидов свинца на поверхности кремниевой подложки.

II. Эффективность механизма молекулярно-лучевой эпитаксии определяется:

- соотношением сил взаимодействия атомов напыляемого материала (отдельных нановключений) с атомами подложки (кремния) и между собой,
- величиной внутренних напряжений нановключения,
- температурой осаждения и другими факторами.

III. Силы взаимодействия характеризуются:

- поверхностной энергией свободной кремниевой подложки;
- поверхностной энергией чистой поверхности осаждаемого материала подложки (халькогениды свинца);
- суммарной энергией образующегося интерфейса между свободной поверхностью осаждаемого материала и подложки.

Реализация того или иного механизма эпитаксиального роста зависит от соотношения между характерными энергиями (ε_{Si} и $\varepsilon_{PbSe\text{-}Si}$). Режим самостоятельного роста изолированных островков халькогенида свинца на гладкой двухмерной поверхности кремния (режим роста Вольмера-Вебера) реализуется, когда наносимый материал

не смачивает подложку и выполняется условие: $\varepsilon_{PbSe\text{-}Si} >> \varepsilon_{Si}$

IV. Осаждение одного материала на поверхность другого позволяет:

- получение качественного покрытия поверхности в широком диапазоне температур подложки,
- реализацию высокой чистоты наносимого материала и с хорошим его сцеплением с подложкой,
- возможность осаждения на подложке материалов самой разной природы,
-относительная простота необходимого технологического оборудования,
- возможность регулирования и контролирования структуры покрытия, размера и толщины нановключений.

V. Эпитаксиальный рост эффективен, когда:

- спонтанное формирование равновесных, периодически упорядоченных, когерентно напряженных, трехмерных наногетероструктур возможно [4], если материал нанокластера из узкозонного (относительно подложки) полупроводника, а сама подложка - широкозонный полупроводник;
- материал нанокластера обладает высокой электроемкостью, чтобы нановключение могло бы стать центром концентрации электронов и формирования p-области наногетероструктуры;
- выбор материала нановключения учитывает также возможность сохранения осаждаемыми нановключениями свойств квантовых точек;
- выбор материала нанокластера и его размер должен быть таким, чтобы он сохранял свойства квантовой точки. Однако, создание квантовых точек связано с временной нестабильностью структур с малым числом атомов из-за возможных их быстрых диффузионных перескоков. Поэтому для обеспечения длительной стабильности наноэлектронных схем желательно в качестве материалов нановключений использовать многокомпонентные соединения, обладающие высокой термической и временной стабильностью. Только в этом случае уместно применение квантовых точек в СЭ, которое в состоянии привести к миниатюризации контактного поля и отдельных токовых процессов.

VI. Материал нанокластера должен обладать высокой электроемкостью, чтобы нановключение могло бы стать центром концентрации электронов и формирования p-области наногетероструктуры. Действительно, заряд q определяется C_o– электроемкостью материала нанокластера, которая пропорциональна её диэлектрической проницаемости ε_N. Так что для шарообразного нанокластера (если нанокластер не шарообразной формы, то q умножается на f)

$$q = C_o \cdot \varphi_o = f \cdot \varepsilon_N \cdot R \cdot \Delta\mu/(e \cdot k),$$

где $k = (4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_o)^{-1}$, $\Delta\mu$ –разность работ выходов контактирующихся материалов, максимальный контактный потенциал между которыми φ_o. Зависящий от формы трехмерной наногетероструктуры параметр f равен:

шар	f = 1		
полушар	f = 3/4		
усеченный шаровой сегмент	$f = (2+2 \cdot v^* - v^{*2})/4$	высота h	$v^* = h/R$ изменяется от 0 до 1
усеченная четырехугольная пирамида	$f = \{\gamma + 1 - \mu^2 \cdot (\gamma - 1)\} \cdot P$ $tg\omega = 2h/(a - b)$	высота h	$P = a^2/(4 \cdot \pi \cdot R^2)$ $\gamma = 1/\cos\omega$

Усеченная с высотой h четырехугольная пирамида является наиболее вероятной формой роста нанокластера согласно эффекту самоорганизации [5]. В зависимости от изменения высоты h численная величина f(s) при этом изменяется от $2 \cdot P$ до $2{,}4 \cdot P$.

Число электронов, стекающих из подложки на одно нановключение, равно (важно, что $N \infty \varepsilon_N$)

$$N = q/e = (e^2 \cdot k)^{-1} \cdot \varepsilon_N \cdot R \cdot f \cdot \Delta\mu$$

VII. Выше отмеченному набору требований удовлетворяют семейства халькогенидов свинца: PbS, PbSe, PbTl. Для них характерны:

- узкая ширина запрещенной зоны: в отличии от «широкозонного» кремния (ΔE_g~1,1 эВ) для халькогенидов свинца ΔE_g ~ 0,2÷0,4 эВ, то есть относительно узкие;
- высокие значения диэлектрической проницаемости: в отличие от кремния ($\boldsymbol{\varepsilon}_{Si}$ =12) для халькогенидов свинца: $\boldsymbol{\varepsilon}_{PbS}$ =175, $\boldsymbol{\varepsilon}_{PbSe}$ = 250, $\boldsymbol{\varepsilon}_{PbTl}$ = 450;
- малые значения эффективных масс носителей заряда: $м_N/м_o$=0,8=$м_P/м_o$ для PbS, $м_N/м_o$ = 0,04 и $м_P/м_o$=0,03 для PbSe [6].

Физика роста нанокластеров

Рост на поверхности кремниевой подложки равновесных, периодически упорядоченных, когерентно напряженных, трехмерных наногетероструктур осуществляется в соответствии с фундаментальным эффектом самоорганизации [5] полупроводниковых систем. В результате его проявления создаются наногетероструктуры (НГС), каждая из которых представляет собой сложную систему из двух компонентов. Первый компонент – р-область в виде нанокластера со свойствами идеальной квантовой точки (с дискретным энергетическим спектром, высоким кристаллическим совершенством и высокой однородностью по размерам). Второй компонент – достаточно протяженная, положительно заряженная n-область.

Самоорганизация наногетероструктур – это эффект спонтанного возникновения в первоначально однородной системе макроскопически упорядоченных нанокластеров, которые в процессе установления термодинамического равновесия с кремниевой подложкой становятся наногетероструктурами.

Спонтанное возникновение упорядоченных нанокластеров связано с дальнодействующими полями упругих напряжений

- двух контактирующих поверхностей (подложки и наноструктуры), которые имеют различные постоянные кристаллических решеток и различные структуры поверхностей;

- наружных поверхностей самих наноструктур – напряжения, возникающие из-за наличия у них граней и границ ребер.

Согласно термодинамике возможность спонтанного возникновения наногетероструктур обусловлена малостью свободной энергии твердого раствора с неоднородным профилем по сравнению со свободной энергией твердого раствора с постоянным составом. Поэтому система самопроизвольно или спонтанно стремится перейти в энергетически устойчивое равновесное состояние с минимумом свободной энергии.

Необходимы следующие условия формирования разреженного равновесного массива наногетероструктур:

- средние расстояния между наногетероструктурами гораздо велики по сравнению с их размерами;

- взаимодействие наногетероструктур между собою, обеспечивающее их устойчивость, определяется упругой анизотропией подложки и является диполь-дипольным (оно пропорционально r^{-3}, имеет характер отталкивания при любом направлении между ними);

- при температурах, далеких от температур плавления, равновесная форма содержит только грани с малой поверхностной энергией;

- равновесная форма отдельной наногетероструктуры не зависит от её объема и совпадает с экспериментально наблюдаемой формой - пирамидой с квадратным основанием;

- минимум энергии на единичную площадь приходится на нанокластер с двумерной квадратной решеткой, энергетическая выгодность которой по сравнению с другими формами объясняется именно упругой анизотропией подложки, а не формой отдельной наногетероструктуры;

- термодинамическая тенденция к коалесценции (слиянию) отсутствует, если отношение изменения поверхностной энергии системы при образовании одной наногетероструктуры и вклада ребер в энергию упругой релаксации меньше единицы;

- возникновение наногетероструктуры связано химическими связями с подложкой и деформационной зависимостью поверхностной энергии.

В реальном случае равновесие успевает установиться только на поверхности. Переход в упорядоченное состояние неоднородных систем, то есть образование наногетероструктур, характерен для любых наноструктур. При выполнении вышеуказанных условий на поверхности массивной подложки формируются строго упорядоченные, когерентные наноструктуры, с идентичными размерами и одинаковыми расстояниями между ними.

Особенности термализации носителей заряда

Отмеченный экстремальный режим эксплуатации, длительное и нормальное функционирование солнечных элементов (СЭ) возможно, если полупроводниковый материал его подложки в состоянии обеспечить достаточно быструю скорость термализации разогретых носителей тока. Разогрев носителей связан с тем, что параллельно с эффективным поглощением довольно узкого спектра солнечного излучения (создающее электричество), происходит также поглощение остальной, наиболее интенсивной части спектра излучения, которое приводит только к нежелательному разогреву СЭ.

Для максимального ограничения негативного влияния такого разогрева необходимо ускорить механизм термализации носителей заряда. При высоких температурах эксплуатации СЭ термализация носителей заряда связана, в основном, с взаимодействием носителей заряда с оптическими и акустическими колебаниями решетки. Особенно при возбуждении высокоэнергичных электронно-дырочных пар, более важным оказывается взаимодействие с продольными оптическими фононами (LO-фононами).

Если возбуждение высокоэнергичных электронно-дырочных пар происходит в присутствии электрического поля, то именно испускание LO-фононов, главным образом, ответственно за установление так называемой скорости насыщения, которая определяет подвижность электронов в полупроводнике. Поэтому при расчете подвижности носителей заряда или процессов их переноса в электрических полях, а также при исследовании динамики процесса термализации их энергии в полупроводниках, становится очень важной роль фононов и фононного взаимодействия [2].

Скорость и время релаксации энергии носителей испытывает сильную зависимость от времени жизни *LO*-фононов. Она определяется частотой эмиссии *LO*-фононов[1]. В кремнии характерная энергия *LO*-фононов составляет 20÷40 мэВ, а релаксация их энергии происходит за время порядка 2÷3 пс [2]. За это период при комнатных температурах фотовозбужденный электрон после излучения ***LO*** фонона[2] пробегает расстояние порядка 10^{-7} м[3], приобретая скорость насыщения ≈10^5м/с.

Последствия термализации носителей заряда.

I. Описанный процесс релаксации энергии и параметры фотовозбужденного электрона, возникающего при поглощении высокоэнергичных фотонов (с энергией значительно большей, чем ширина запрещенной зоны), характерен как для традиционных СЭ, так и для СЭ с новыми контактными структурами (НКС) [3].

Однако есть существенная разница: в традиционных СЭ свободный пробег высокоэнергичных носителей тока с излучением ***LO*** фононов завершается их рекомбинацией, так что вклада они в фототок практически не вносят. Совсем иная картина происходит в СЭ с НКС, в которых прямо у поверхности присутствует длинное встроенное электростатическое контактное поле **E**(x) [3]. Хотя это поле значительно слабее, чем в традиционных р-п переходах, но оно - очень длинное (один-два десятка мкм) и практически покрывает весь объем, в котором происходит поглощение света. Поэтому фотовозбужденный электрон, излучая ***LO*** фонон на расстояниях ≈ 10^{-7} м, практически уже в термализованном состоянии продолжает свой пробег в этом длинном встроенном электростатическом контактном поле **E**(x).

Излучение ***LO*** фононов (а значит и процесс термализации фотовозбужденных носителей тока) происходит за гораздо меньшее время, чем время жизни носителей тока. Они успевают в контактном поле **E**(x) без рекомбинации дойти до электродов и тем самым внести вклад в фототок, то есть увеличить вклад поглощения высокоэнергичных фотонов, чего не наблюдается в СЭ из строго кристаллических материалов. Это первое преимущество СЭ с новыми контактными структурами (НКС): увеличивается вклад в фототок электронно-дырочных пар, рожденных при поглощении высокоэнергичных фотонов.

Быстрая фононная термализации горячих носителей в СЭ с НКС
приводит к ***фиолетовому сдвигу*** спектра эффективного поглощения света

II. Другая отличительная особенность СЭ с НКС заключается в сильном ослаблении отражательной способности его подложки. Она (подложка) из не строго кристаллического материала (технического кремния) с большой концентрацией пространственных неоднородностей и различными взаимно компенсирующими структурными дефектами (как донорной, так и акцепторной природы). Снижение отражения поверхности автоматически усиливает поглощение света вблизи поверхно-

[1] путем испускания одного - двух LO-фононов

[2] чем выше температура, тем меньше время излучения.

[3] 10-7м = 0,1мкм - это почти длина свободного пробега для высокоэнергичных электронов и длина области пространственного заряда в традиционных кремниевых р-п переходах

сти, сопровождающееся рождением электронно-дырочных пар, их разделением на электрон и дырку прямо в области пространственного заряда (ОПЗ). По всей глубине подложки присутствует большое количество различных взаимно компенсирующих структурных дефектов, которые резко уменьшают эффективность возможных центров рекомбинации. Это, в свою очередь, увеличивает соответствующий фототок, то есть опять хоть и небольшой, но фиолетовый сдвиг за счет электронно-дырочных пар, рожденных при поглощении высокоэнергичных фотонов.

Ослабление отражения от поверхности подложки приводит к дополнительному небольшому ***фиолетовому сдвигу*** спектра эффективного поглощения света

III. Электрооптические свойства подложки из не строго кристаллического технического кремния с большой концентрацией пространственных неоднородностей и различных взаимно компенсирующих структурных дефектов (как донорной, так и акцепторной природы) очень схожи с соответствующими свойствами аморфного кремния. Связано это с тем, что структурные дефекты формируют в запрещенной зоне многочисленные дискретные локализованные глубокие состояния для электронов, спектр которых вдоль по глубине запрещенной зоны образует хвосты плотности энергетических состояний.

Глубина хвостов плотности состояний характеризует наблюдаемое в экспериментах уменьшение величины порога собственного поглощения, то есть поглощение света при $\hbar\omega < \Delta E_g$ в соответствии с правилом Урбаха (ΔE_g –ширина запрещенной зоны материала подложки). Поскольку:

-локализованных в подложке глубоких состояний, ответственных за образование хвостов плотности состояний, много;

-они (состояния) в подложке расположены близко друг к другу;

-температура подложки всегда относительно высока именно через эти состояния подложки реализуется прыжковая проводимость носителей тока.

Отмеченные свойства СЭ с НКС допускают возможность ощутимого фотовозбуждения электронно-дырочных пар при поглощении света с энергией $\hbar\omega < \Delta E_g$, то есть допускают эффективное поглощение ИК света. При этом все четыре процесса (поглощение света, рождение электронно-дырочных пар, разделение их на электроны и дырки, перенос носителей тока к соответствующим электродам) осуществляется у поверхности в пределах встроенного электростатического контактного поля и завершается образованием дополнительного фототока. Т.е., имеем дело с явным инфракрасным сдвигом спектра эффективного поглощения света.

Наличие большой концентрации структурных дефектов с дискретными локализованными глубокими состояниями приводит к ***инфракрасному сдвигу*** спектра эффективного поглощения света

IV. Есть еще одно в экономическом отношении немаловажное преимущество СЭ с новыми контактными структурами: встроенное электростатическое контактное протяженное поле (10÷20мкм) располагается непосредственно у поверхности подложки, что позволяет уменьшить общую толщину СЭ с НКС в два-три раза по сравнению с толщиной подложки в традиционных р-п переходах или гетеропереходах.

Встроенное электростатическое контактное протяженное поле у поверхности подложки приводит к ***двух - трехкратному уменьшению общей толщины подложки***

Литература:

1. А.Фаренбрух, Р.Бьюб // Электроннные свойства легированных полупроводников // Из-во Наука. Москва.1979. С.416

2. М.Строшио, М.Дутта /Фононы в наноструктурах /Пер. с англ. под ред. Г.Н.Жижина. - М.,ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 320 с.

3. E. Z. Imamov, T. A. Djalalov, , and R. A. Muminov/ Electrophysical Properties of the “Nano-object—semiconductor” new contact structure/ ISSN 1063-7842, Technical physics, 2015, Vol. 60, No. 5, pp. 740-745 © Pleiades Publishing, Lid., 2015.

4. T.A.Djalalov, E.Z.Imamov, R.A.Muminov/«The Electrical Properties of a SC with Multiple Nano scale p–n Transitions» //ISSN 0003701X, Applied Solar Energy, 2014, Vol. 50, No. 4, p.p. 228–232. © Allerton Press, Inc., 2014; E.Z.Imamov, T.A.Djalalov, R.A.Muminov, H.Kh.Rakhimov //The theoretical model of new contact structure “nanoobject-semicondactor“ //J.”Computational nanotechnology”. XII. 2015. 80 page , №4. Moscva p.p58-63 ISSN 2313-223X; Imamov E. Z., Djalalov T. A., Muminov R.A., Rakhimov R.Kh. //The Difference Between The Contact Structure With Nanosize Inclusions From The Semiconductor Photodiodes// J.”Computational nanotechnology”. №3-2016, p.p.203-207, ISSN 2313-223X. Moscva

5. N.N.Ledentsov, V.A.Shchukin, V.M.Ustinov, P.S.Kop’ev, Zh.I.Alferov, D.Bimberg /Quantum dot heterostructures: fabrication, properties, lasers. Review /ФТП,1998 **32.**4, p.p.385-410; H.Haken // Synergetics // Springer, Berlin-Heidelberg, 1997.

6. A.I.Gusev //Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology//Moscow. Fizmatlit. 2009; I.M.Tsidilkovsky / Electrons and holes in semiconductors //Moscow.1972. “Science”. p. 640; Темур Джалалов, Эркин Имамов // Принципы наногелиоэнергетики. Актуальные проблемы сочетания и развития двух технологий // LAP LAMBERT Academic Publishing. Monograph, www.omniscriptum.com, e-mail:info@omniscriptum.com Saarbrucken, Deutschland / 2016 / P.113, ISBN: 978-3-659-89808-2

Тошкент давлат ахборот технологиялари универсрситети,
ЎзФА “Физика-Қуёш” ФТИ ИИБ
2016 йил 27 январда қабул қилинган
(Тақризчи: проф. И.Каримов)