

В диссертационный совет Д002.205.02 при
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки –
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

ОТЗЫВ

**об автореферате диссертации Кен Ольги Сергеевны
«Фотоэлектрические и оптические свойства структур на основе
аморфных и кристаллических кремниевых наночастиц»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.10 – физика
полупроводников.**

Диапазон спектра 0,2 – 1,1мкм давно освоен: прежде всего, классический кремний, а также фосфид галлия, нитриды позволяют создавать фотоприёмники с квантовой эффективностью, приближающейся к 100%, с большим быстродействием (высокие и сверхвысокие частоты), с предельным обнаружением (счёт единичных фотонов). Однако рецензируемая диссертация (автореферат) показывает, что нет границ научному прогрессу. Она представляет не только академический, но и определённый практический интерес. Прежде всего, напрашивается указанное самой О.С.Кен возможное применение исследованных структур в солнечных элементах для повышения КПД. Как известно, здесь оптимальна ширина запрещённой зоны полупроводника 1,35эВ и особенно двойные и тройные структуры, преобразующие излучение Солнца соответственно в двух-трёх диапазонах спектра. Структура диссертанта – композитный широкозонный слой Si-наночастиц и слой собственно кремния как раз и

является прообразом такого преобразователя. Действительно, ширина запрещённой зоны кремния 1,1эВ, а слоёв наночастиц, как следует из автореферата, примерно 2,2эВ, что охватывает нужное значение 1,35эВ. Надо только разработать теперь дешёвую технологию получения элементов больших площадей и обеспечить высокую чувствительность в фотовольтаическом режиме без внешнего смещения. Решающее преимущество рассматриваемых структур то, что они являются аналогами гетеропереходов, но нет головной боли при обеспечении изопериодичности.

Как и следует из названия, в автореферате представлены результаты исследования фотоэлектрических и оптических свойств структур на основе аморфных и кристаллических наночастиц кремния. Структуры изготовлены тремя различными технологическими методами, при этом слои кремниевых наночастиц наносились на «родной» материал – на кристаллический кремний.

Самостоятельный интерес представляют исследования оптических свойств собственно аморфных и кристаллических композитных слоёв кремниевых наночастиц, предшествующие исследованию структур.

Соискателем показана возможность получения высокой чувствительности одновременно и в коротковолновой (0,3 – 0,5мкм), и более длинноволновой (0,5 – 1,1мкм) областях спектра в структурах с кремниевыми наночастицами. Это их выгодно отличает от большинства «обычных» кремниевых фотодиодов. Получены также интересные новые результаты, связанные с обнаружением усиления фототока исследованных структур с наночастицами в различных спектральных областях. Рассмотрены механизмы, приводящие к появлению усиления. Так, в спектрах квантовой эффективности структур с нанопористым кремнием обнаружено пороговое возрастание этой эффективности в УФ

области. Эффект объяснен соискателем рождением дополнительных электронно-дырочных пар в результате ударной ионизации горячими фотоносителями в ансамбле наночастиц. Важно отметить, что это является первым наблюдением данного эффекта в фотоэлектрических свойствах структур с Si наночастицами.

Весьма интересны структуры с композитными слоями из наночастиц Si и Au. Они обладают большой чувствительностью в широком спектральном диапазоне 0,3–1,1 мкм, которая при оптимальном соотношении Si и Au в композитном слое превышает 15 А/Вт в видимой области спектра. Усиление фототока в таких структурах соискатель объясняет как механизмом усиления фотопроводимости, так и транзисторным усилением фототока. Выше отмечалось возможное применение структур О.С.Кен для солнечных элементов. Теперь можно отметить также перспективу использования структур О.С.Кен для создания фотодетекторов слабых сигналов с широкой спектральной областью чувствительности 0,3 – 1,1 мкм.

Теперь замечания.

Замечания по содержанию. 1. Стр.7. «Пороговый рост квантовой эффективности фототока с увеличением энергии кванта свыше 2,4эВ обусловлен ударной ионизацией...». Но от энергии фотона может зависеть только «красная» граница чувствительности, а ударная ионизация, разогрев носителей в гомопереходах зависит только от электрического поля. В гетеропереходах может быть специфическое умножение – на одном каскаде оно строго фиксировано и равно двум. Удвоенная энергия фотона может способствовать здесь только первому акту ударной ионизации, но не последующим. Диссертант ссылается на работу [D.Timmerman et al., Nat. Photonics. – 2008, v.2, №2], но следует дать свои пояснения одному из центральных выводов диссертации. Кроме того, рабочее напряжение структур удивительно мало, всего 2,7В

(подпись к рис.3), тогда как заметная ударная ионизация, лавина в кремниевых ЛФД при типичных концентрациях и градиентах примесей развивается при 30В и много более. Нужны эпюры полей, концентраций.

2. Стр.7. На этой же странице увеличение чувствительности на порядок О.С.Кен объясняет механизмом усиления фотопроводимости либо транзисторным усилением. Но из анализа материалов главы 4 (стр.12-16) можно предположить, что разработанные структуры являются диодами, вероятно, диодами Шоттки, а не фоторезисторами и не транзисторами.

Замечание по оформлению. Стр.6, 7, 13, «Квантовая эффективность фототока». Такого термина нет, есть термин «квантовая эффективность фотоприёмника (ФД, ЛФД и т.д.)». Как нет и термина «чувствительность фототока»: «чувствует» не фототок, а фотоприёмник. А квантовая эффективность и чувствительность – одна физическая величина (отношение электрического сигнала к оптическому), но только выраженная в разных единицах.

И теперь следует сказать стандартную фразу: высказанные замечания не снижают высокий рейтинг диссертации. О.С.Кен поддерживает марку Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе. Сама тематика – квантовые эффекты, слои кремниевых наночастиц находится на переднем крае современной науки. На все вопросы ВАК можно дать только положительные ответы: диссертационная работа О.С.Кен актуальна, нова, достоверность её результатов и сделанных в ней выводов несомненна; её результаты опубликованы в рецензируемых научных журналах и докладывались на российских и международных конференция; автореферат содержит все разделы, предусмотренные требованиями ВАК.

В диссертации решена важная научно-техническая задача – создана технология, изготовлены образцы структур «аморфные и

кристаллические слои кремниевых наночастиц – кремний», проведён комплекс исследований физических, оптических и фотоэлектрических свойств этих структур. Работа Ольги Сергеевны Кен удовлетворяет требованиям, выдвигаемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присвоения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Заместитель генерального директора по инновациям и науке
ГНЦ РФ АО "НПО "Орион" (111537, Москва, ул. Косинская, д. 9),

доктор ~~технических наук~~

Бурлаков Игорь Дмитриевич

Доктор ~~технических наук~~, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
лауреат ~~премий~~ Правительства РФ

Тришенков Михаил Алексеевич