

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию А.Н. Власова
«Особенности электронных и кинетических свойств анизотропных и
кластерных полупроводниковых структур», представленную на соискание
учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.10 – Физика полупроводников

Тема диссертации, связанная с исследованием структуры электрического поля в полупроводниковых пластинах ограниченных геометрических размеров с объёмной анизотропией свойств и изучением влияния полей упругих и пластических деформаций псевдоморфных плёнок на электрические параметры и энергетическую зонную структуру эпитаксиальных гетеропереходов Si–Ge, является **актуальной**. Для нанотехнологий актуальны исследования особенностей электронных свойств напряжённых кремниевых кластеров и эффектов, вызванных взаимной связью граничных атомов в них с германиевой подложкой. В практическом аспекте интерес к малодефектным эпитаксиальным гетероструктурам Ge_xSi_{1-x} –Ge и гетероструктурам с псевдоморфными плёнками Si, Ge обусловлен более высокими значениями подвижностей электронов и дырок в них, по сравнению с недеформированными слоями, и возможностью использования оборудования и технологических процессов при создании интегральных схем на основе кремния.

К наиболее важным и обладающим **новизной**, следует отнести следующие результаты работы Власова А.Н. **Впервые** получены аналитические выражения, описывающие распределение потенциала электрического поля под токовым зондом в объёме анизотропного полупроводникового кристалла или плёнки с заданным соотношением геометрических размеров. Они позволяют оценивать изменение локализации электрического поля, а также сопротивление растекания в зависимости от параметров анизотропии электропроводности кристалла, соотношения геометрических размеров сечения зонда и планарных размеров плёнки. Автором **впервые** предложен целый ряд распределений потенциала электрического поля в анизотропных средах при различных граничных условиях. Существенно, что в работе анализируется влияние расположения токового зонда по поверхности кристалла с ограниченными размерами, имеющего объёмную анизотропию электропроводности. **Достоверность** полученных результатов подтверждает, полученное в виде (1.3.9) выражение, характеризующее распределение потенциала в анизотропном полупроводниковом образце в случае $a,b,d \rightarrow \infty$. **Впервые** получены аналитические выражения, позволяющие рассчитывать электрические поля в объёме анизотропных образцов разной геометрической формы. Особенно важным, с практической точки зрения является расчёт для образцов цилиндрической формы. Такие формы имеют выращиваемые объёмные кристаллы.

Значимым результатом работы является построение модели, позволяющей производить расчёт внутренних деформаций, связанных с псевдоморфизмом полупроводниковых плёнок, в гетероструктуре, состоящей из кристаллических слоёв кремния и германия. Несомненно, найдёт **практическое применение** доказательство увеличения в два раза подвижности носителей заряда в

направлении растяжения в псевдоморфных кремниевых плёнках в гетероструктурах Si–Ge. Получены выражения, позволяющие определять постоянные кристаллических решёток типа алмаза или сфалерита и относительные деформации вдоль заданного кристаллографического направления в полупроводниковых структурах, состоящих из нескольких слоёв.

На основе численных расчётов и экспериментальных данных, представленных в § 1.4, разработана методика и даны практические рекомендации по её использованию при определении компонент удельной электропроводности и подвижности носителей заряда. Показана возможность проведения измерений без изменения положения зондового пробника и, тем самым, сведены к минимуму повреждения поверхности образца. Приведены критерии применимости методики с использованием соотношений толщин плёнок и межзондовых расстояний.

Автор обосновал, разработал и реализовал методику измерения удельных электропроводностей в двух взаимно перпендикулярных направлениях для двухслойных n⁺/n и p⁺/p структур на основе четырёхзондового метода с линейным расположением зондов.

В диссертации Власова А.Н. подробно обосновано использование восьмиконтактного метода нахождения компонент тензора удельной электропроводности и холловской подвижности носителей заряда в слоистых полупроводниковых гетероструктурах.

Достоверность результатов численного моделирования подтверждаются не только ссылками на данные некоторых работ других авторов, но и экспериментальной проверкой (§§ 1.3.5 и 1.4) некоторых результатов расчётов, проведённых автором диссертации. Очень хорошее совпадение (рис. 3 в автореферате и рис. 1.8 в диссертации) данных эксперимента расчётного модельного распределения свидетельствуют об **обоснованности** и корректности моделей электрического поля в объёме анизотропных материалов, которые автор представил в работе.

Замечания по работе. Соискатель неоднократно отмечает, что «в работах [21,22] авторы рассмотрели различные моменты электронного переноса в средах с анизотропией проводимости», они «отражены в трудах [36,37]», по данному вопросу «выкладки строго обоснованы и чётко сформулированы», «в трудах [29-31] дано широкое и точное описание» явлений обусловленных анизотропией ряда свойств полупроводников, но отсутствует лишь «хорошо рассчитанная модель» (термин не совсем понятен). Тем самым, на мой взгляд, автор не логично доказывает актуальность задачи исследования особенностей распределения потенциала и плотности тока в анизотропных полупроводниковых кристаллах и плёнках, хотя задача такого исследования – одна из основных в его работе.

Существование эквипотенциальных линий (поверхностей) с прямыми углами (рис. 2.21 в диссертации стр. 87 и рис. 8 стр. 12 в автореферате) крайне сомнительно и не находит объяснения с позиций базовых понятий общей физики. Не понятно куда в этих областях будут направлены векторы напряжённости поля и как в этих областях определять градиент потенциала, где функция φ(x,y,z) не дифференцируемая. Если граница прямоугольной области совпадает с границей токового контакта (это следует из масштабов рисунка), то не понятно: во-первых, чем обусловлено резкое увеличение напряжённости электрического поля на границе контакта и последующее уменьшение её к центру контакта; во-вторых,

если контакт проводящий, то весь его объём эквипотенциален и тогда не понятно о каких эквипотенциальных линиях в контактной области может идти речь. Очевидно, что при построении эквипотенциальных линий в математической модели не учитывался эффект стекания зарядов.

В задачах исследования всё-таки речь идёт об изучении влияния анизотропии свойств в кремниевых покрытиях, сформированных на подложках кристаллов германия. Однако, не вполне понятно, почему некоторые данные численных расчётов сопоставляются с экспериментальными данными, известными из литературы, для диарсенидов кадмия и цинка, которые действительно обладают анизотропией электрических свойств. Кроме того, в §1.1 автор отмечает, что анизотропией свойств обладают кристаллы соединений $A^{II}B^V$, состоящие из тех же элементов, но в другом стехиометрическом соотношении.

Некоторые места в диссертации требуют уточнений, разъяснения словосочетаний или стилистической правки. Так во введении – актуальность темы–употреблён термин «композиционные слои структуры», в то время как речь идёт о кремний-германиевых структурах, представляющих собою плёнки (слои) кремния на основе германия. Там же, не понятно употребление термина «ограниченные образцы». Хотелось бы видеть в тексте уточнения об ограниченности образцов – по толщине, по геометрическим размерам массивного кристалла полупроводника или в тонкоплёночном образце. Далее, наверное, опечатка, но она приводит к разночтению слов «явления...при переносах заряда», скорее автор имел в виду упорядоченный перенос заряда. Не понятно обобщение «полупроводниковые плёнки различного характера». Кроме того, электрическая и оптическая анизотропия характерна для многих кристаллов, например для $A^{II}B^{VI}$ или $A^{II}B^V$, но последние надо отличать по отношению к кристаллам $A^{II}B_2^V$. Часто в тексте встречается – «влияние на основные энергетические параметры гетеропереходов», на стр. 3 (в автореферате), 6, 7, 8 (в диссертации) – без уточнения о том какие параметры, в частности для гетеропереходов, подразумеваются. Очевидно, подразумевалось на стр.6 растяжение решётки кремния, а не «кремния» или «в кремнии». Не оговорены термины «параметры неоднородного полупроводника», «неоднородность плёнок иnanoструктур» хотя при формулировке четвёртой задачи исследования (стр.7) или при формулировке практической значимости результатов (стр.9) уже употреблены слова определяющие назначение технической разработки – это анизотропные полупроводники и неоднородность плёнок может быть и по химическому составу, и по кристаллической структуре. На стр. 22 слова «в сечении плёнки в плоскости $y=b/2$ » надо, наверное, заменить, указав, что сечение проходит в плоскости XOY через координату $y=b/2$. Если ε – линейный размер токового контакта, то величина $a/10,2\varepsilon$ не совпадает по размерности с величинами a,b,d и приравнивать их не корректно (стр. 22), аналогично, под рисунком 2 в автореферате не справедливо равенство для a)-случая. Не показано различие матриц (1.3.1) и (1.4.1) и, соответственно, тогда (стр. 25 и стр.40) уравнения (1.3.3) и уравнения (1.4.3), при составлении которого использован рис. 1.9 (стр. 40), соответствующий рис. 1.10 (стр.42), рис. 1.11 (стр.45). Не введено обозначение s – расстояние между токовыми зондами (§ 1.4).

В диссертации есть технические ошибки. Так, например, ссылка [10] из списка использованной литературы не используется в тексте. В параграфе 1.1

отмечена анизотропия свойств кристаллов $A^{II}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ со ссылкой на работу [8] по карбиду кремния. В оглавлении диссертации: введение – на стр.4, по факту оно начинается на стр.5; название параграфа 1.1 в оглавлении содержит дополняющее уточнение – обзор литературных данных, в тексте диссертации §1.1 – обзор. В формулах (1.1.1) на стр. 15 не даны названия величин: I , σ_1 , σ_2 , d и в (2.2.1) величин x_k , x_i , u_k . Для (1.1.1) это сделано (лишь частично) в подрисуночной подписи к рис. 1.1 на стр.19, кроме того на рис.1.1 уже изображена другая величина I_1 – ток зонда. В тексте диссертации есть абсолютно одинаковые фразы, например, на стр. 19 и стр. 25. Подпись к рис. 1.2 а), б), в) не соответствует рисунку: рис. 1.2а соответствует случаю в), рис.1.2в – случаю с), рис. 1.2с – случаю а). На рис. 2 в автореферате случай в) не проиллюстрирован и, соответственно, не содержит таких несоответствий. Общее замечание – после подписей к рисункам (ГОСТ 2.105-95) не ставится точка.

В диссертации содержатся орфографические ошибки. Во введении, в обосновании актуальности пропущен предлог «с» в десятой строке сверху на стр.5. Во втором положении, выносимом на защиту, пропущен предлог, надо – «приводит к...возрастанию». На стр.14 – «авторы работы [20] опирался...», по-видимому, опирались. После формулы (1.2.8) надо поставить точку. В формуле (1.2.6) в правой части между строк лишний знак – точка с запятой.

Отмеченные недостатки и замечания не влияют на благоприятное, в целом, впечатление от диссертации, не ставят под сомнение практические рекомендации и сделанные выводы. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в семи рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, которые отражают основные положения выносимые на защиту. Диссертация Власова Артура Николаевича «Особенности электронных и кинетических свойств анизотропных и кластерных полупроводниковых структур» по объему выполненных исследований, достоверности и значимости полученных результатов, их новизне, обоснованности положений выносимых на защиту соответствует требованиям ВАК РФ к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Официальный оппонент:

Буданов Александр Владимирович,
доцент кафедры физики ФГБОУ ВПО
«Воронежский государственный университет инженерных технологий»,
кандидат физ.-мат.наук., доцент

Буданов А.В.

Адрес: 394000, Россия, г. Воронеж, пр. Революции, 19.
Телефон: +7-4732-55-35-21
Эл. почта: budanova9@gmail.com



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»
Подпись т. <u>Буданова А. В.</u>
ЗАВЕРЯЮ
Начальник управления кадров <u>09.06.2014 г. № 5 Ольга Ю.</u>