

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

На правах рукописи

ФЕДОСОВ
Анатолий Васильевич

УДК 621.315.592

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ
В МНОГОДОЛИННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ
(n -Si И n -Ge)
ПРИ ОДНООСНОЙ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ

01.04.10 — физика полупроводников и диэлектриков

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Киев — 1992 г.

Работа выполнена в Институте полупроводников АН Украины
и на кафедре физики Луцкого индустриального института

Официальные оппоненты:

академик АН Молдовы, доктор физико-математических наук, профессор Д.В.Гицу

доктор физико-математических наук
В.А.Шендеровский

доктор физико-математических наук
А.Е.Беляев

Ведущая организация

- Черновицкий государственный университет

Защита состоится "30" октября 1992 г. в 14¹⁵ часов
на заседании специализированного совета Д.01С.25.01 при Институте полупроводников АН Украины по адресу: 252026, Киев-26, проспект Науки, 45.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института полупроводников АН Украины.

Автореферат разослан "23" сентября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доктор физико-математических наук

С.С.Ищенко

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00816372 (R)

АВ-25.610

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На протяжении нескольких последних десятилетий и в настоящее время кремний надежно сохраняет ведущее положение одного из основных материалов полупроводниковой электроники. И так как значительная часть характеристических параметров приборов, изготавливаемых на его основе, и общий уровень надежности их в работе во многом зависит от свойств исходного кремния, а жесткость эксплуатационных условий по совокупности ряда воздействий (таких как термические, радиационные, ультразвуковые, механические и др.) со временем только повышается - постановка комплексных исследований электрофизических свойств этого материала применительно к упомянутым выше условиям сейчас, как и прежде, продолжает оставаться весьма актуальной. Особенно результативными оказываются исследования электрофизических свойств Si в комплексе с более хорошо изученным модельным материалом, каким является Ge.

Одним из наиболее эффективных и распространенных методов исследования свойств германия и кремния является измерение кинетических коэффициентов. Этот метод позволяет относительно просто исследовать как энергетический спектр носителей заряда, так и их взаимодействие с кристаллической решеткой и дефектами (механизмы рассеяния).

Обладая кубической симметрией, n -Ge и n -Si в обычных условиях проявляют изотропные свойства. В то же время, благодаря многодолинности зонной структуры, их изотропные характеристики, к числу которых относится и удельное сопротивление (ρ), - довольно легко, с приложением одноосных механических напряжений (X) вдоль соответствующих кристаллографических осей, трансформируются в анизотропные. Особый интерес представляет

АНБ Им. В. Стафаника
АН УРСР

изучение эффекта пьезосопротивления примесных многодолинных полупроводников в области сильных одноосных напряжений сжатия, поскольку эти исследования позволяют:

1) получать информацию как о минимумах энергии в зоне проводимости, так и о формировании хвостов плотности состояний, которые простираются вглубь запрещенной зоны;

2) изучать особенности пьезосопротивления в случаях, когда механическое напряжение не совпадает с главными кристаллографическими направлениями и для вывода функции $\varrho = \varrho(x)$ на на-
мещение необходимы большие давления;

3) надежно определять значения констант деформационного потенциала, а также параметров анизотропии подвижности и рассеяния носителей тока;

4) выяснять относительно просто и убедительно вклад f - и g - переходов в междолинное рассеяние носителей тока в n -Si;

5) осуществлять "деформационный переход" от металлической проводимости к активационной.

Область физики реальных кристаллов, относящаяся к процессам, происходящим в полупроводниках при облучении частицами высоких энергий, бурно развивается, что связано с определяющей ролью радиационных дефектов в формировании электрофизических свойств этих полупроводников. В кругу упомянутых выше задач безусловно центральное место принадлежит проблеме глубоких уровней, с наличием которых в запрещенной зоне полупроводника связана специфика в проявлении электрофизических свойств, представляющих самостоятельный познавательный и практический интерес. Эта проблема находится в ряду наиболее актуальных в экспериментально-теоретическом плане также в связи с неотложностью задач обеспечения стойкости элементов полупроводниковой элект-

роники в радиационных полях и освоением перспективных технологий производства радиационно стойких полупроводниковых приборов.

В связи с дальнейшей микроминиатюризацией элементов электронной техники, неуклонным повышением уровня интеграции и связанным с этим переходом к использованию кристаллов кремния большого диаметра в полупроводниковой индустрии, особый интерес представляют исследования полупроводниковых кристаллов при наличии в их объеме слоистых периодических неоднородностей (СПН), роль которых в формировании кинетических эффектов в облученных кристаллах особенно велика. Если в исходных кристаллах распределение легирующей примеси в периодически чередующихся слоях обычно характеризуется сравнительно малой величиной разности максимальной и минимальной концентраций, то облучение частицами высоких энергий, вводящее компенсирующие дефекты в полупроводник, может приводить (при надлежащем выборе дозы облучения) не только к существенному возрастанию градиентов удельного сопротивления, но в некоторых случаях в значительной мере (если не определяющим образом) может изменять электрофизические свойства кристаллов.

Основной целью работы было комплексное изучение природы кинетических явлений в многодолинных полупроводниках при больших одноосных упругих деформациях и их облучении частицами высоких энергий.

В соответствии с поставленной целью, в круг основных задач этой работы входили:

I. Исследование пьезосопротивления n -Si и n -Ge в области сильных одноосных упругих деформаций при произвольных направлениях χ и $\bar{\chi}$ по отношению к главным кристаллографическим осям.

2. Изучение (посредством измерений кинетических коэффициентов) различных механизмов рассеяния носителей тока в многодолинных полупроводниках и определение основных параметров, характеризующих их зонную структуру.

3. Исследование влияния СПН на кинетические явления в облученных кристаллах n -Si и n -Ge.

4. Экспериментальное изучение влияния глубоких уровней и примесных состояний на кинетические эффекты в многодолинных полупроводниках.

5. Проверка предсказаний теории Херринга-Смита об отсутствии пьезосопротивления в многодолинных полупроводниках при симметричном расположении оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов и исследование возможностей получения перехода металл-диэлектрик для таких кристаллографических направлений.

Научная новизна работы.

1. Всесторонне исследовано продольное пьезосопротивление n -Si и n -Ge при произвольной ориентации механических напряжений относительно осей высокой симметрии и получены угловые зависимости продольного пьезосопротивления. С высокой точностью определено значение сдвиговой константы деформационного потенциала и впервые установлены пределы применимости использованного метода для таких целей.

2. Изучены особенности рассеяния носителей тока в многодолинных полупроводниках в широком концентрационном интервале и сделано заключение о доминирующей роли f -переходов в междолинном рассеянии. На основе полученных данных определены значения параметров анизотропии подвижности и анизотропии рас-

сеяния носителей тока в n -Si.

3. Экспериментально установлено влияние слоистых периодических неоднородностей на кинетические эффекты в γ -облученных кристаллах n -Si и n -Ge.

4. Оценено влияние концентрации радиационных дефектов на величину пьезосопротивления в γ -облученной германии до и после $p \rightarrow n$ -конверсии. Определены направления и величины деформационного смещения глубоких энергетических уровней радиационного и технологического происхождения в Ge и Si.

5. Обнаружено и подробно исследовано пьезосопротивление в n -Ge и n -Si, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов $\chi'' \gamma'' [100]$ для n -Ge и $\chi'' \gamma'' [111]$ для n -Si). Получен и исследован в n -Ge и n -Si для этих направлений переход от металлической к активационной проводимости, что представляет собой деформационный механизм перехода металл-диэлектрик в этих кристаллах.

Практическая значимость работы,

состоит в следующем.

1. Анализ угловых зависимостей продольного пьезосопротивления n -Ge и n -Si позволил предсказать и обнаружить направления, для которых имеет место линейный характер изменения $\varphi = f(\chi)$ и достаточно высокая тензочувствительность в широком интервале механических напряжений, что может быть использовано при разработке тензодатчиков на основе этих кристаллов.

2. На основании измерений продольного и поперечного пьезосопротивления разработаны и реализованы методы определения значений параметров, характеризующих зонную структуру и механизмы рассеяния носителей тока в исследуемых кристаллах.

3. Показано, что степень влияния слоистых периодических неоднородностей на кинетические эффекты в n -Si и n -Ge определяется уровнем компенсации образцов при γ -облучении и ориентацией слоев по отношению к направлению вектора тока, что необходимо учитывать при изготовлении и практическом использовании интегральных схем и различных датчиков, работающих в условиях повышенной радиации. Подтверждена более высокая радиационная стойкость к γ -облучению нейтронно-легированного n -Si (P).
4. Анализ деформационных скоростей смещения (в шкале энергий) глубоких уровней для основных кристаллографических направлений позволил оценить по данным пьезосопротивления симметрию дефектов, ответственных за наличие этих уровней в запрещенной зоне исследуемых кристаллов.
5. Осуществлены оценки концентрационного интервала примесей в n -Ge и n -Si обеспечивающие возможность реализации деформационно-индуцируемого перехода металл-диэлектрик в случае симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов и показаны возможности деформационного управления этим переходом за счет изменения зонных параметров исследованных кристаллов.

Защищаемые положения.

- I. Механизмы и закономерности, характерные для продольного пьезосопротивления в n -Ge и n -Si, обусловленные перераспределением носителей тока между однотипными долинами зоны проводимости, смешивающимися по шкале энергии с разной скоростью при произвольной ориентации оси деформации в плоскости (110) относительно главных кристаллографических

направлений.

2. Методы определения сдвиговой константы деформационного потенциала, параметров анизотропии подвижности и анизотропии рассеяния носителей тока в n - Si при различных значениях вклада примесного рассеяния.
3. Закономерности, определяющие механизмы рассеяния носителей тока в многодолинных полупроводниках, установленные:
 - а) в результате сопоставления экспериментальных данных по температурной зависимости холловской подвижности и пьезосопротивления n - Si с данными расчетов, выполненных на основании теории анизотропного рассеяния;
 - б) на основе анализа влияния компенсации на анизотропию рассеяния носителей тока;
 - в) в результате выявления парциальных вкладов f - и g - переходов в междолинное рассеяние носителей тока в недеформированных и одноосно деформированных кристаллах n - Si ;
 - г) вследствие качественного различия механизмов рассеяния носителей тока в кристаллах германия и кремния n -типа;
 - д) на основе анализа исследованного эффекта уменьшения времени релаксации с увеличением энергии электронов в сильно легированных кристаллах n - Si , обусловленного рассеянием носителей тока на флуктуациях в распределении атомов легирующей примеси в объеме кристаллов.
4. Экспериментальное доказательство того, что наличие СПН в необлученных кристаллах n - Ge и n - Si , выращиваемых из расплава, практически не влияет на величину пьезосопротивления и холловской подвижности носителей тока. Анизотропные свойства этих параметров для кристаллографически эквивалентных направлений определяются (из-за присутствия СПН)

уровнем компенсации образцов при γ -облучении. Кристаллы n -Si, легированные примесью фосфора методом ядерной трансмутации, отличаются высоким уровнем однородности распределения легирующей примеси и однородностью компенсации γ -облученного материала (анизотропия проводимости по отношению к оси роста в таких кристаллах отсутствует).

5. Эффект пьезосопротивления в n -Si и n -Ge при наличии в запрещенной зоне глубоких энергетических уровней обусловлен, как правило, влиянием двух определяющих причин:

а) смитовским перераспределением носителей тока между поднимающимися и опускающимися долинами;

б) изменением концентрации носителей тока в зоне проводимости за счет изменения с давлением энергетического зазора между глубоким уровнем и долинами.

Полученные данные по исследованию пьезосопротивления многодолинных полупроводников при больших одноосных давлениях позволяют определять анизотропию деформационного смещения глубоких уровней, которая непосредственно отображает симметрию дефектов технологического и радиационного происхождения, ответственных за наличие этих уровней.

6. Наблюдаемые (и необъяснимые по общепринятой теории Смита-Херринга) новые эффекты пьезосопротивления в условиях симметричного расположения оси-деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в n -Ge и n -Si.

7. Переход металл-диэлектрик, осуществляемый в n -Si и n -Ge путем изменения их зонной структуры, достигаемой:

а) в условиях реализации инверсии типа абсолютного минимума зоны проводимости ($\Delta_1 - \Delta_1$) в n -Ge при χ и $[100]$, приводящей к значительному увеличению глубины залегания примесных

состояний;

б) посредством изменения поперечной компоненты эффективной массы электронов при деформационной непараболичности Δ_c -долин зоны проводимости, сопровождаемой возрастанием энергии ионизации мелких доноров и отрывом примесной зоны от с-зоны.

Апробация работы.

Основные результаты, представленные в диссертации докладывались на: всесоюзном симпозиуме по радиационным дефектам в полупроводниках (Минск, 1972г.), республиканском совещании по радиационным повреждениям в твердых телах (Киев, 1974г.), V международной конференции по физике и технике высоких давлений (Москва, 1975г.), VI межотраслевой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (Москва, 1976г.), II всесоюзном совещании по глубоким уровням в полупроводниках (Ташкент, 1980 г.), III всесоюзной научно-технической конференции по технологии получения и материаловедению однородно легированного кремния (Москва, 1982г.), IV всесоюзной научно-технической конференции по совершенствованию технологии получения и исследований монокристаллов особо чистого полупроводникового кремния, международной конференции "мелкие примеси в полупроводниках" (Швеция, 1986г.), всесоюзной научной конференции "фотоэлектрические явления в полупроводниках" (Ташкент, 1989г.), XII всесоюзной конференции по физике полупроводников (Киев, 1990г.), XXIX пленуме научного Совета АН УССР по проблемам физики полупроводников, республиканских школах по актуальным вопросам физики полупроводников, а также на объединенном научном семинаре отделов №7 и №19 ИП АН УССР и семинарах кафедры термоэлектричества и физической метрологии Чер-

новицкого госуниверситета.

Публикации. Основной материал диссертации опубликован в 43 научных работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и общих выводов, содержит 315 страниц машинописного текста, включающего 92 рисунка, 9 таблиц и библиографию из 330 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и основные задачи работы, составившие идейную канву проведенных исследований.

Вводная часть и первая глава диссертации посвящены рассмотрению феноменологической теории эффекта пьезосопротивления в многодолинных полупроводниках как для области слабых (реализуется условие $\delta\epsilon \ll kT$), так и для области сильных одноосных упругих деформаций, когда выполняется условие $\delta\epsilon \gg kT$ и достигается полное переселение электронов из поднимающихся (в шкале энергии) долин в опускающиеся долины. Кратко описаны оригинальные методики измерения продольного и поперечного пьезосопротивлений в области предельно допустимых одноосных упругих деформаций.

Представлены данные по исследованию продольного пьезосопротивления n -Ge и n -Si в условиях, когда механическое напряжение прикладывается под некоторым углом к осям высокой симметрии кристалла и вклад в пьезосопротивление электронов, переселяющихся из долин, поднимающихся с различной скоростью при изменении X , значительно разнесен по шкале X , что приводит к

более сложному характеру зависимости $g = f(x)$.

Описана методика определения сдвиговой константы деформационного потенциала Ξ_u в n_2Si исходя из того, что отношение концентраций электронов в опускающемся (n_1) и поднимающемся (n_2) минимумах легко представляется для случая $X \parallel y \parallel [100]$ через данные по продольному пьезосопротивлению:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{g_x}{g_\infty} \right) \left(K \frac{g_x}{g_\infty} - 1 \right)^{-1} \quad (1)$$

С другой стороны, при условии термодинамического равновесия, отношение $\frac{n_2}{n_1}$ определяется величиной энергетического расщепления минимумов при одноосной упругой деформации:

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp \left(- \frac{\Xi_u (S_{11} - S_{12}) \cdot X}{k T} \right) \quad (2)$$

В дальнейшем после приравнивания соотношений (1), (2) и логарифмирования, методика отыскания сдвиговой константы сводится к тому, что экспериментально измеряя зависимость $g_x^{[100]} = f(x)$ и обрабатывая в соответствии с (1) получаем линейную зависимость $\lg \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$ от X , наклон которой и дает значение $\Xi_u = 9,3 \pm 0,1$ эВ.

Отклонение зависимости $\lg \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = f(x)$ от прямой линии свидетельствует о включении дополнительных (к междолинному перераспределению носителей тока) механизмов пьезосопротивления, что и позволяет использовать данный метод для идентификации механизмов пьезосопротивления в многодолинных полупроводниках. Поэтому в конце главы приведены температурные, концентрационные и другие особенности пьезосопротивления, влияющие на нарушение линейности $\lg \left(\frac{n_2}{n_1} \right) = f(x)$, а соответственно и на надежность определения значения константы деформационного потенциала.

Вторая глава посвящена описанию особенностей рассеяния

носителей тока в многодолинных полупроводниках. Рассмотрен вопрос об анизотропии рассеяния носителей тока в n -Si и выяснено влияние степени компенсации примесей, имевшихся в объеме кристалла, на анизотропию рассеяния. Изучение пьезосопротивления кристаллов n -Si, имеющих различную разностную и суммарную концентрацию примесей, показало, что компенсация, по крайней мере при $\frac{N_a}{N_d} \leq 0,64$ и при $N_i = N_d + N_a \leq 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ практически не изменяет анизотропии рассеяния носителей тока, а наблюдаемые изменения связаны лишь с изменением вклада примесного рассеяния. Приводятся теоретические расчеты, которые хорошо описывают полученные нами (и опубликованные другими авторами) опытные данные по холловской подвижности в широком температурном интервале. Показано, что при $T > 100\text{K}$ расхождение опытных данных с результатами теоретических расчетов устраняется посредством учета междолинного рассеяния на фононах с температурами 630 и 190 K. Описана принципиальная возможность и практическая реализация разделения вкладов f - и g -переходов в междолинное рассеяние одноосно деформированных кристаллов n -Si. Поскольку в условиях насыщения $\varphi = f(x)$ упруго деформированного n -Si вдоль $[100]$ полностью включены во всем температурном интервале исследований являются лишь f -переходы (полное переселение электронов в две спускающиеся долины), то из совпадения температурных зависимостей дрейфовой подвижности электронов в деформированном n -Si с аналогичной зависимостью в недеформированном n -Ge следует вывод об определяющей роли f -переходов в междолинном рассеянии.

Представлены результаты определения параметров анизотропии подвижности и рассеяния электронов в n -Si для широкого температурного и концентрационного интервалов. Из результатов иссле-

дований следует, что при малых концентрациях донорной примеси в кристаллах n -Si при $T=76K$ значение параметра анизотропии подвижности для электронов можно надежно определять по данным одного лишь продольного пьезосопротивления ($\chi'' \mathcal{J}'' [100]$):

$$K = \frac{3}{2} \frac{\mathcal{J}_{\infty}''}{\mathcal{J}_0} - \frac{1}{\epsilon} \quad (3)$$

а при концентрациях легирующей примеси, обеспечивающей смешанное рассеяние и при повышении температуры (из-за проявления междолинного рассеяния), для корректного определения значения параметра K проводились измерения как продольного (\mathcal{J}_{∞}''), так и поперечного ($\mathcal{J}_{\infty}^{\perp}$) пьезосопротивлений в области насыщений.

Изложены результаты исследований особенностей рассеяния носителей тока в n -Si при среднем и сильном уровнях легирования. При измерениях концентрационных зависимостей $\mathcal{J}_x/\mathcal{J}_0 = \mathcal{J}(x)$ выявлены следующие характерные особенности: во-первых, с увеличением концентрации примеси фосфора кривые $\mathcal{J}_x/\mathcal{J}_0 = \mathcal{J}(x)$, в отличие от более чистых кристаллов, проходят через максимум с последующим уменьшением удельного сопротивления при увеличении x ; во-вторых, при концентрациях электронов, примыкающих к области вырождения, наблюдается значительное увеличение значения $\mathcal{J}_{\text{max}}/\mathcal{J}_0$ с возрастанием n_e .

Первая особенность пьезосопротивления объясняется формированием в запрещенной зоне хвостов плотности состояний и освобождением при одноосной упругой деформации электронов, локализованных на этих состояниях при $T=78K$. Вторая особенность связана с изменением характера рассеяния носителей тока в вырожденном n -Si. Уменьшение времени релаксации, обуславливающее увеличение значения $\mathcal{J}_{\text{max}}/\mathcal{J}_0$ с увеличением энергии электронов свидетельствует о проявлении рассеяния носителей тока на

флуктуациях в распределении атомов легирующей примеси в объеме исследуемых кристаллов. На основе анализа расположения семейства кривых $\frac{P_x}{P_0} = f(x)$ для n -Si, легированного различными примесями (P , Se , As) сравнимых концентраций, сделан вывод о том, что примесные атомы фосфора в кремнии проявляют повышенную склонность к эффективному образованию примесных скоплений, тогда как примесные атомы мышьяка распределяются в объеме кристаллов Si наиболее равномерно.

В третьей главе приведены результаты исследований влияния слоистых периодических неоднородностей на пьезосопротивление и холловскую подвижность носителей тока в γ -облученных и необлученных кристаллах n -Si и n -Ge. И так как СПИ представляют собой периодическое изменение концентрации примеси вдоль направления роста, самопроизвольно реализующееся при любой технологии выращивания полупроводниковых кристаллов из расплава, то измерения проводились на образцах двух групп, в которых слои роста ориентировались по-разному относительно направления тока и механического напряжения. Образцы I группы вырезались вдоль оси роста кристалла и, соответственно, слои роста располагались перпендикулярно к направлению тока (для n -Ge в направлении [111], а для n -Si - [100]), а в образцах II группы вектор тока в случае n -Si располагался в плоскости слоев роста, а в случае n -Ge - возможно близко к плоскости этих слоев с тем, чтобы в образцах I и II группы кристаллографические ориентации были физически эквивалентными.

Показано, что для исходных кристаллов германия и кремния, в которых градиенты удельного сопротивления незначительны, зависимости пьезосопротивления для образцов обеих групп практически совпадают; мало при этом различаются также значения

холловской подвижности и средней концентрации носителей тока. Различия зависимостей $\varrho = f(x)$ и подвижностей носителей тока для образцов из разных групп начинают качественно и количественно проявляться после γ -облучения, когда в запрещенной зоне полупроводников появляются глубокие энергетические уровни, принадлежащие радиационным дефектам.

Особый интерес представляет изучение возможностей управления влиянием СПН на кинетические эффекты. Исследования показали, что одной из таких возможностей является использование γ -облучения с последующим воздействием освещения, в результате чего изменения холловской подвижности и вид зависимостей $\varrho = f(x)$ для обеих групп образцов определяются перезарядкой уровней радиационных дефектов с деформацией и при подсветке, изменяя тем самым условия экранирования и величину амплитуды потенциального рельефа, определяемого СПН и пространственным распределением компенсирующих центров, возникающих при γ -облучении.

Из анализа полученных результатов следует, что эффект пьезосопротивления является весьма чувствительным к наличию СПН в γ -облученных кристаллах, а облучение существенным образом начинает влиять на величину подвижности носителей заряда и $\varrho = f(x)$ при дозах, создающих концентрацию радиационных дефектов в кристаллах, примерно равную минимальной концентрации легирующей примеси в слоях. Наряду с этим было установлено, что в отличие от кристаллов, легированных примесью фосфора из расплава, в нейтронно-легированном кремнии зависимости $\varrho = f(x)$ и холловские подвижности носителей тока для образцов из разных групп (I и II) практически мало отличаются после таких же доз γ -облучения, что свидетельствует о более однородном распределении примеси по объему трансмутационно-легированных кристаллов

и отсутствии в них значительных градиентов удельного сопротивления, обуславливаемых (в случае кристаллов n -Si(p), легированных через расплав) наличием СДН.

В четвертой главе изложены результаты исследования влияния глубоких уровней и примесных состояний на кинетические эффекты в кристаллах кремния и германия. После краткого обзора о состоянии проблемы теории и экспериментальных методов изучения глубоких уровней в полупроводниках, представлены результаты исследования продольного пьезосопротивления германия с примесью золота, а также γ -облученного Ge для случая линейных и нелинейных по деформации эффектов. Характер изменения зависимостей $\varrho = f(x)$ с понижением температуры объясняется наличием двух причин изменения сопротивления: перераспределением носителей тока между поднимающимися и опускающимися долинами с возрастанием одноосных деформаций (что приводит к росту $\varrho = f(x)$ с последующим выходом на насыщение); увеличением концентрации носителей в долинах за счет изменения энергетического зазора между глубоким уровнем и долинами (что приводит к спаду $\varrho = f(x)$). Перераспределение носителей в области температур примерно 100 К практически заканчивается при давлениях порядка 6000-7000 кг/см², поэтому остается лишь второй механизм изменения пьезосопротивления, что приводит к линейным зависимостям $\lg \varrho = f(x)$. По линейным участкам этих зависимостей определяется величина изменения энергетического зазора между уровнем и долинами согласно:

$$\Delta E = \frac{2.3(\Delta \lg \varrho) \cdot \alpha \cdot kT}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot \Delta x} \quad (\text{эВ}) \quad (4)$$

α - коэффициент, меняющийся от 1 до 2, в зависимости от степени заполнения уровня.

Из полученных результатов следует, что для всех главных кристаллографических направлений энергетический зазор между глубоким уровнем золота (и радиационных дефектов) $E_c - 0,2эВ$ и долинами в $n-Ge$ всегда уменьшается. Но изменение энергетического зазора может быть обусловлено как за счет смещения долин зоны проводимости, так и за счет смещения самого глубокого уровня. Поэтому используя экспериментальные значения ΔE на основании (4) и известные величины смещения нижайших долин зоны проводимости при одноосной упругой деформации, определены величины и направления смещения глубоких уровней $E_c - 0,2эВ$ (принадлежащих атомам золота и радиационным дефектам) для главных кристаллографических направлений. Анизотропия величин их смещения позволила сделать вывод об анизотропии строения исследованных дефектов: оказались выделенными - направление $[100]$ для золота и $[110]$ - для центра радиационного происхождения.

После облучения дозой $1,3 \cdot 10^{18} \gamma$.кв/см² германий конвертирует в p -тип проводимости и на температурной зависимости концентрации носителей тока проявляется акцепторный уровень $E_v + 0,27 эВ$. Ход зависимостей $\rho = f(x)$ для основных кристаллографических направлений при фиксированных температурах объясняется, подобно как и в случае облученного $n-Ge$, учетом одновременного проявления нескольких механизмов, влияющих на величину пьезосопротивления в $p-Ge$ с глубокими уровнями: 1) переселение дырок из верхней отщепленной зоны в нижнюю зону и существенной перестройки зонного спектра дырок при деформации; 2) изменения концентрации дырок в валентной зоне из-за изменения величины энергетического зазора между потолком валентной зоны и глубоким энергетическим уровнем $E_v + 0,27 эВ$.

Используя экспериментальные зависимости $\varphi = f(x)$ и формулу (4), определена для главных кристаллографических направлений величина изменения энергетического зазора между уровнем $E_v + 0,27$ эВ и потолком валентной зоны.

Описано влияние одноосной упругой деформации на энергию ионизации примесных состояний фосфора в n -Si. Установлено, что при ориентации X и [111] в невырожденных кристаллах с повышенным уровнем легирования энергия ионизации примесных состояний увеличивается с возрастанием X , а для других ориентаций оси деформации высокой степени симметрии - она уменьшается. Анализ результатов по численным значениям и направлениям смещения глубокого уровня $E_c - 0,17$ эВ в γ -облученном n -Si, получаемых на основании исследования продольного пьезосопротивления для главных кристаллографических осей, позволил заключить, что А-центр (которому принадлежит этот уровень) характеризуется выделенной в пространстве осью, которая совпадает с кристаллографическим направлением [100]. Такой вывод об анизотропии этого радиационного дефекта хорошо коррелирует с результатами, полученными с применением метода ЭПР.

В заключении главы показано, что характерные особенности пьезосопротивления, наблюдаемые в нейтронно-легированных, а также сильно компенсированных кристаллах n -Si, непосредственно связаны с отсутствием полного "истощения" примесных центров в области 78 - 150 К и некоторой зависимостью от упругой деформации энергетического зазора между донорными уровнями и дном с-зоны.

Пятая глава посвящена изучению пьезосопротивления и перехода металл-диэлектрик в n -Si и n -Ge при условии симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических

эллипсоидов. В опытах с $n\text{-Ge}$ для случая $\chi \parallel z$ [100] привычное отсутствие пьезосопротивления сменяется при $X > 15000 \text{ кГ/см}^2$ резким его возрастанием. Анализ экспериментальных данных и учет особенностей зонной структуры $n\text{-Ge}$ позволил объяснить наличие такого эффекта рассеянием носителей тока из "германиевых" минимумов энергии (типа Δ_1) в "кремниевые" (типа Δ_1). Осуществление инверсии типа абсолютного минимума s -зоны ($\Delta_1 \rightarrow \Delta_1$) приводит, кроме того, к примерно 4^X -кратному увеличению энергии ионизации мелких примесей, что, в свою очередь, обеспечивает возможность получения перехода металл-диэлектрик при $T=4,2\text{К}$ в кристаллах с концентрацией примеси превышающей в 2-3 раза критическую. Переход от металлического к активационному типу проводимости наблюдался на исследованных нами образцах $n\text{-Ge}$ с концентрациями примеси Sb в интервале $(1,8 \div 3,26) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Отрыв примесной зоны от s -зоны при этом настолько велик, что обеспечивает локализацию электронов на примесных состояниях и переход к проводимости активационной. Поэтому удельное сопротивление таких кристаллов возрастает на 3-5 порядков. При этом рост концентрации легирующей примеси в $n\text{-Ge}$ (Sb) приводит к сдвигу индуцируемого деформацией МД перехода в область больших значений X , что объясняется смещением уровня Ферми в область более высоких энергий с увеличением уровня легирования.

Прямым подтверждением перехода от металлической проводимости к активационной является трансформация линейных вольт-амперных характеристик (при $X=0$) в нелинейные (при больших X) и изменение наклона кривых $\varrho = f(T)$, получаемых при фиксированных значениях одноосного механического напряжения $\chi \parallel [100]$

Обсуждены причины появления пьезосопротивления в $n\text{-Si}$ для случая $\chi \parallel z$ [111], примечательной особенностью которого

является нелинейное и существенное по величине возрастание ϱ_x/ϱ_0 , начиная с самых малых механических напряжений. Установлено также, что это пьезосопротивление отличается от смитовского и по характеру зависимости его от температуры, поскольку в этом случае $\varrho_x/\varrho_0(300\text{ K}) > \varrho_x/\varrho_0(77\text{ K})$. Наблюдаемые закономерности пьезосопротивления объясняются деформационной непараболичностью Δ_1 -долин зоны проводимости, возникающей при снятии вырождения в точке X на краю зоны Бриллюэна за счет сдвиговой деформации и увеличением вследствие этого компонент поперечной эффективной массы носителей тока.

Подобно тому, как и в случае $n\text{-Ge}$, в вырожденных кристаллах $n\text{-Si}$, легированных примесями фосфора и сурьмы, в области высоких X « [111] » получен при $T=4,2\text{ K}$ переход от металлической проводимости к активационной при значениях концентраций легирующих примесей, превышающих более чем в 2 раза критическую концентрацию перехода МД. В противоположность концентрационно-контролируемому переходу МД, определяемому преобразованием примесных состояний, формированием примесных зон и перекрытием их с s -зоной, в сильно легированных кристаллах, исходной причиной реализованного в данном случае перехода является деформационная перестройка s -зоны связанная с непараболичностью Δ_1 -долин, приводящей к возрастанию компонент поперечной эффективной массы электронов и отрыву примесной зоны от дна s -зоны.

Показано, что с увеличением уровня легирования кристаллов $n\text{-Si}$ переход МД смещается в область более высоких механических напряжений, подтверждая тем самым, что из-за увеличения энергии Ферми в недеформированных кристаллах, отрыв примесной зоны от зоны проводимости достигается именно при таких значе-

ниях X . Преобразование линейных ВАХ (характерных для малых X) в нелинейные (и даже S -образные) в области $X > 30000$ кГ/см² и изменение наклона температурных зависимостей $\varrho = \varrho(T)$ при больших X также свидетельствует о переходе к активационной проводимости.

В заключении подведены итоги выполненного комплекса исследований и сделаны общие выводы по диссертации.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Исследовано продольное пьезосопротивление n -Si и n -Ge в широком интервале изменения механических напряжений ($0 \leq X \leq 21000$ кГ/см²), прикладываемых в плоскости (110) под определенными углами к осям высокой симметрии. Наблюдаемое в опытах с n -Ge явление последовательного перераспределения электронов между различными долинами зоны проводимости хорошо согласуется с данными теоретических расчетов, выполненных на основе теории анизотропного рассеяния. Получены угловые зависимости продольного пьезосопротивления, обеспечивающие возможность надежной оценки уровня точности при измерении соответствующих зонных параметров в n -Si и n -Ge, а также обнаружены направления, характеризуемые линейностью в изменении $\varrho = \varrho(X)$ в широком интервале механических напряжений.

2. По данным пьезосопротивления, измеряемого в условиях X и γ и [100] при $T=78K$ определено с достаточно высокой точностью значение сдвиговой константы деформационного потенциала $\bar{\Sigma}_4 = 9,3 \pm 0,1$ эВ для n -Si и впервые установлены пределы применимости использованного метода при определении

этого важного параметра.

3. Тщательно проведенное сопоставление результатов расчета температурной зависимости холловской подвижности с соответствующими экспериментальными данными показало, что теоретически рассчитанная зависимость $\mu_n = f(T)$ при учете междолинного рассеяния количественно согласуется с опытными данными для наиболее чистых кристаллов n -Si. Исследование пьезосопротивления кристаллов n -Si, имеющих различную разностную и суммарную концентрацию примесей позволило заключить, что степень компенсации исследуемых кристаллов практически не изменяет анизотропии рассеяния носителей тока, а наблюдаемые изменения этого параметра однозначно связаны лишь с изменением вклада примесного рассеяния.
4. На основании изучения температурных зависимостей удельного сопротивления недеформированного и одноосно деформированного (при $\chi = 15000 \text{ кг/см}^2$) n -Si сделан вывод о доминирующей роли в междолинном рассеянии ξ -переходов и незначительности η -переходов. С наличием междолинного рассеяния ξ -типа в n -Si, и отсутствием этого вида рассеяния в n -Ge связаны также основные отличительные особенности пьезосопротивления в этих кристаллах.
5. Показано, что в кристаллах n -Si при $T = 76\text{K}$ значения параметров анизотропии подвижности и анизотропии рассеяния электронов в условиях преобладающего рассеяния на акустических фононах можно надежно определять по данным одного лишь продольного пьезосопротивления. Однако, при концентрациях примеси, обеспечивающих смешанное рассеяние и при температурах проявления междолинного рассеяния - для

корректного определения $K = K_m/K_c$ необходимы измерения как продольного, так и поперечного пьезосопротивления (с обеспечением выхода их на насыщение).

6. Исследование пьезосопротивления n -Si при сильной одноосной упругой деформации и эффекта Холла в широком концентрационном интервале ($1,7 \cdot 10^{14} - 1,6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) позволило получить информацию о формировании в запрещенной зоне хростов плотности состояний, а также сделать вывод о характере рассеяния носителей тока на флуктуациях в распределении атомов легирующей примеси в объеме исследуемых кристаллов. Анализ этих результатов указывает на то, что (при сравнимых концентрациях примеси) наиболее эффективно образуются скопления примесных атомов фосфора; атомы же мышьяка распределяются в объеме кристаллов Si наиболее равномерно.
7. Установлено, что характер влияния слоистых периодических неоднородностей на пьезосопротивление и холловскую подвижность носителей тока в кристаллах n -Si и n -Ge, выращиваемых из расплава, определяется уровнем компенсации образцов при γ -облучении и ориентацией этих слоев по отношению к направлению вектора тока, чего не наблюдается в кристаллах n -Si свободных от слоев роста, если их легирование осуществляется за счет применения метода ядерной трансмутации.
8. Изучение влияния одноосных упругих деформаций на положение глубоких уровней технологического и радиационного происхождения в n -Ge показало, что барические коэффициенты смешения уровней золота и радиационного дефекта для главных кристаллографических направлений различны. Из этих же опытов получена информация о симметрии этих дефектов, а также

оценено смещение уровня $E_v + 0,27$ эВ в облученных кристаллах германия после $p \rightarrow p$ -конверсии.

9. По данным пьезосопротивления определена анизотропия A -центра в γ -облученном n -Si, а также установлено влияние одноосной упругой деформации на энергию ионизации примесных состояний фосфора в кремнии. Показано, что некоторые характерные особенности пьезосопротивления нейтронно-легированных и сильно компенсированных кристаллов n -Si обусловлены зависимостью от деформации энергетического зазора между донорными уровнями и дном s -зоны.
10. Обнаружены, подробно изучены и объяснены новые эффекты пьезосопротивления в n -Si и n -Ge, возникающие при симметричном расположении оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов.
11. Реализован в области гелиевых температур переход от металлической проводимости к активационной путем деформационного изменения зонной структуры кристаллов n -Ge и n -Si, приводящей к радикальной перестройке примесных состояний и примесных зон в этих условиях.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Семенук А.К., Панкевич Э.В., Федосов А.В., Доснат В.П. Влияние глубоких энергетических уровней на пьезосопротивление n -Ge // УГП. - 1972. - т.6, №. - с.974-975.
2. Даховский И.В., Коломоец В.В., Федосов А.В. Явление последовательного перераспределения электронов в n -Ge при одноосной упругой деформации // УГП. - 1975. - т.9, №11. - с.2217-2219.

3. Baranskiĭ P.I., Kolomoets V.V., Fedosov A.V. The Angular Dependences of the Longitudinal Piezoresistance of n-Ge and n-Si at 78 K // Phys. Stat. Sol (a).-1976.-v.34, N2.-p.K119-K121.
4. Баранский П.И., Даховский И.В., Коломеец В.В., Федосов А.В. Определение сдвиговой константы деформационного потенциала в кремнии // ФТП.-1976.-т.10, №7.-с.1367-1369.
5. Баранский П.И., Коломеец В.В., Сусь Б.А., Федосов А.В. Междолинное рассеяние в n-Si в температурном интервале 76-300 K// Тезисы докл. международной конференции по физике и технике высоких давлений.-М.: Наука, 1975.-с.107-108.
6. Федосов А.В., Букало В.Р., Тимошук В.С. Об анизотропии пьезосопротивления в облученном n-Ge со слоистым распределением примеси // ФТП.-1984.-т.18, №6.-с.1135-1137.
7. Семенюк А.К., Федосов А.В., Панасюк Л.И., Тимошук В.С. Пьезосопротивление облученного n-Si со слоистым распределением примеси // ФТП.-1986.-т.20, №3.-с.545-547.
8. Федосов А.В., Яшинский Л.В. Определение сдвиговой константы деформационного потенциала в γ -облученном кремнии.- В сб. Явления переноса в многодолинных полупроводниках при наличии дефектов // Рукопись депон. в Укр.НИИМТИ.-1988.-№2565.-Ук-79с.
9. Федосов А.В., Яшинский Л.В., Тарасенко В.Б. Определение сдвиговой константы деформационного потенциала в облученном n-Ge // Рукопись депон. в Укр.НИИМТИ.-1991.-№1503.-Ук-8с.
10. Баранский П.И., Даховский И.В., Коломеец В.В., Федосов А.В. Исследование анизотропии рассеяния носителей тока в n-Si// ФТП.-1976.-т.10, №7.-с.1345-1348.

11. Баранский П.И., Даховский И.В., Коломеец В.В., Федосов А.В. Междолинное рассеяние в n -Si в температурном интервале 78-300K // ФТП.-1976.-т.10, №.-с.1460-1482.
12. Баранский П.И., Коломеец В.В., Федосов А.В. Отличительные особенности пьезосопротивления германия и кремния п-типа, обусловленные различием механизмов рассеяния электронов в этих кристаллах // ФТП.-1981.-т.15, в.4.-с.698-701.
13. Федосов А.В., Яшинский Л.В., Тимошук В.С. Особенности деформированного n -Ge для случая $\chi \ll \chi_0$ [14] // Рукопись депон. в Укр.НИИТИ.-1991.-№1504.-7с.
14. Баранский П.И., Коломеец В.В., Охрименко Ю.А., Федосов А.В. Влияние одноосной упругой деформации на энергию ионизации примеси фосфора в кристаллах кремния // ФТП.-1982.-т.16, в.2.-с.361-364.
15. Федосов А.В., Тимошук В.С., Яшинский Л.В. Об определении параметра анизотропии подвижности в n -Si // ФТП.-1988.-т.22, в.9.-с.1704-1705.
16. Федосов А.В., Тимошук В.С., Яшинский Л.В. Об особенностях определения параметра анизотропии рассеяния электронов в n -Si // УЖ.-1990.-т.35, в.2.-с.265-267.
17. Коломеец В.В., Федосов А.В., Шаповалов В.П. Пьезосопротивление n -Si : <P> при сильной одноосной упругой деформации // ФТП.-1976.-т.10, в.7.-с.1390-1392.
18. Коломеец В.В., Федосов А.В. Пьезосопротивление сильнолегированного n -Si. Тезисы докл. VI межотраслевой научно-технической конференции молодых ученых и специалистов.- М.: ГИРЕДМЕТ, 1976.-с.163.
19. Коломеец В.В., Федосов А.В. Особенности пьезосопротивления n -Si, легированного примесями P, Sb, As // ФТП.-

1976.-т.10, в.11.-с.2043-2046,

20. Семенюк А.К., Федосов А.В., Назарчук П.Ф., Букало В.Р. Пьезосопротивление облученного n -Ge при проявлении слоистых неоднородностей // ФТП.-1982.-т.16, в.7.-с.1264-1267.
21. Семенюк А.К., Федосов А.В., Назарчук П.Ф. Пьезосопротивление n -Ge с радиационными дефектами // ФТП.-1980.-т.14, в.9.-с.1809-1811.
22. Федосов А.В., Панасюк Л.И., Ткачук Ю.Я. Влияние слоев роста на электрофизические свойства монокристаллического германия и кремния.- В сб. Влияние дефектов и примесей на явления переноса в кремнии и германии // Рукопись депон. в УкрНИИПИ.-1986.-№2773.-Ук.-с.20-28.
23. Федосов А.В., Букало В.Р., Ящинский Л.В. Фоточувствительность γ -облученных кристаллов n -Ge при одноосной деформации // Тезисы докл. Всесоюзной конференции "Фотоэлектрические явления в полупроводниках".-Ташкент.-1989.-с.253.
24. Коломеец В.В., Симоненко Ю.В., Федосов А.В. Влияние "фоновой" электрически нейтральной примеси аргона на механическую прочность кристаллов кремния // Докл. АН УССР, серия "А".-1984.-№10.-с.61-63.
25. Семенюк А.К., Федосов А.В., Панасюк Л.И., Букало В.Р., Ковальчук О.В. Особенности влияния слоистых неоднородностей на пьезосопротивление в монокристаллах кремния // Изв. вузов "Физика".-1989.-в.1.-с.115-116.
26. Баранский П.И., Коломеец В.В., Федосов А.В., Шаловалов В.П. Пьезосопротивление обычных и нейтронно-легированных кристаллов кремния // ФТП.-1981.-т.15, в.5.-с.864-866.

27. Дмитренко Н.Н., Ермаков В.Н., Коломеец В.В., Панасюк Л.И., Федосов А.В., Хиврич В.И. Явления переноса в нейтронно-легированном γ -облученном n -Si (ρ) при сильном одноосном давлении // Тезисы докл. XII Всесоюзной конференции по физике полупроводников.-Киев.-1990, ч.1.-с.272-273.
28. Семенюк А.К., Федосов А.В. Пьезосопротивление n -Ge при наличии глубоких уровней // ФТП.-1979.-т.13, в.5.-с.1001-1003.
29. Семенюк А.К., Федосов А.В., Панкевич З.В., Доскач В.П. Пьезосопротивление в полупроводниках, содержащих глубокие энергетические уровни. В сб. "Физика твердого тела".-К.: КГПИ, 1972.-с.48-52.
30. Баранский П.И., Коломеец В.В., Федосов А.В. Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в n -Ge // ФТП.-1976.-т.10, в.11.-с.2179-2181.
31. Семенюк А.К., Панкевич З.В., Федосов А.В., Доскач В.П. Влияние давления на акцепторные волновые функции в облученном германии // Тезисы докл. Всесоюзного симпозиума "Радиационные дефекты в полупроводниках."-Минск, 1972.-с.134-135.
32. Панкевич З.В., Федосов А.В., Доскач В.П. Влияние давления на γ -облученные монокристаллы n -Ge // Тезисы докл. Республиканского совещания "Радиационные повреждения в твердых телах".-Киев, 1974.-с.29-30.
33. Семенюк А.К., Федосов А.В., Ковальчук О.В., Назарчук П.Ф., Тимошук В.С. Об анизотропии глубоких центров в n -Ge // Тезисы докл. II Всесоюзного совещания по глубоким уровням в полупроводниках.-Ташкент, 1980.-176с.

34. Федосов А.В., Панасюк Л.И., Тимошук В.С. Пьезосопротивление облученного германия // ФТП.-1988.-т.22, в.7.-с.1297-1299.
35. Федосов А.В., Панасюк Л.И., Ткачук Д.Я. Пьезосопротивление $p\text{-Ge}$ при наличии глубоких уровней.- В сб. Явления переноса в многодолинных полупроводниках при наличии дефектов // Рукопись депон. в Укр.НИИТИ.-1988.-№2565.-Ук-79с.
36. Федосов А.В., Букало В.Р. Пьезосопротивление $n\text{-Si}$ при наличии примесной зоны.- В сб. Влияние дефектов и примесей на явления переноса в кремнии и германии // Рукопись депон. в Укр.НИИТИ.-1986. №2773.-Ук.-с.35-42.
37. Баранский П.И., Коломеец В.В., Федосов А.В. Пьезосопротивление, возникающее в условиях симметричного расположения оси деформации относительно всех изоэнергетических эллипсоидов в $n\text{-Si}$ // ФТП.-1979.-т.13, в.4.-с.815-819.
38. Семенюк А.К., Назарчук П.Ф., Федосов А.В. Пьезосопротивление однороднолегированных монокристаллов кремния при γ -облучении // Электронная техника, серия 6, материалы.-1983.-в.3(176).-с.60-62.
39. Баранский П.И., Коломеец В.В., Сусь Б.А., Федосов А.В. Пластическая деформация $n\text{-Ge}$ в условиях сильного одноосного сжатия при 300 и 78 К// Тезисы докл. Международной конференции по физике и технике высоких давлений.-М.: Наука, 1975.-с.106.
40. Баранский П.И., Ермаков В.Н., Коломеец В.В., Назарчук П.Ф., Федосов А.В. Переход металл-диэлектрик в $n\text{-Ge}$, индуцируемый сильной одноосной деформацией // Докл. АН УССР. Сер. А. физ.-мат. и техн. науки.-1987, №11.-с.34-36.
41. Берца А.И., Ермаков В.Н., Коломеец В.В., Назарчук П.Ф., Па-

наски Л.И., Федосов А.В. Переход от металлической проводимости к активационной в одноосно деформированном $n\text{-Ge} \langle \text{Se} \rangle$ // ФТП.-1989.-т.23, в.12.-с.2244-2245.

42. Ермаков В.Н., Коломоец В.В., Панасюк Л.И., Родионов В.Е., Федосов А.В. Деформационно индуцируемый переход металл-диэлектрик в $n\text{-Si}$ с неупорядоченно распределенными примесями // Тезисы докл. XII Всесоюзной конференции по физике полупроводников.-Киев.-1990, ч.1.-с.129-130.

43. Федосов А.В., Букало В.Р., Яшинский Л.В. Особенности пьезосопротивления γ -облученного $n\text{-Ge}$ при подсветке // ФТП.-1990.-т.24, в.4.-с.754-756.

Заказ 2746

Тираж 100

263000 г. Луцк, ул. Ленина, 27
Волинская областная типография

1.
2.
3.
4.
5.
6.
7.
8.
9.
10.
11.
12.
13.
14.
15.
16.
17.
18.
19.
20.
21.
22.
23.
24.
25.
26.
27.
28.
29.
30.
31.
32.
33.
34.
35.
36.
37.
38.
39.
40.
41.
42.
43.
44.
45.
46.
47.
48.
49.
50.
51.
52.
53.
54.
55.
56.
57.
58.
59.
60.
61.
62.
63.
64.
65.
66.
67.
68.
69.
70.
71.
72.
73.
74.
75.
76.
77.
78.
79.
80.
81.
82.
83.
84.
85.
86.
87.
88.
89.
90.
91.
92.
93.
94.
95.
96.
97.
98.
99.
100.

100000

AB 25.610
AB 25.610