

СИНИЕ SiC-6H-СВЕТОДИОДЫ

Вишневская Б. И., Дмитриев В. А., Коваленко И. Д., Коган Л. М.,
Морозенко Я. В., Родкин В. С., Сыркин А. Л., Царенков Б. В.,
Челноков В. Е.

Представлены электрические и электролюминесцентные характеристики и параметры светодиодов синего свечения, изготовленных на основе карбида кремния политипа 6H.

p-n-Структуры изготавливались методом бесконтейнерной жидкостной эпитаксии на подложках *n*-SiC-6H; *n*-слой содержал азот, *p*-слой был легирован алюминием.

p-n-Переход резкий, емкостное напряжение отсечки 2.6 В (293 К). Площадь *p-n*-перехода светодиодной меза-структуры порядка 10^{-3} см². Свет выводился через *n*-подложку.

Максимум спектра электролюминесценции расположен в синей области. Зависимость интенсивности люминесценции от тока близка к линейной. Внешний квантовый выход равен 10^{-4} (293 К) и уменьшается с ростом температуры. Сила света светодиодов с полушириной диаграммы направленности излучения 12° равна 2 мкд при токе 20 мА и 293 К (напряжение 3.4 В). Быстродействие светодиода порядка 1 мкс.

1. *Предварительные замечания.* За четверть века развития полупроводниковой люминесцентной электроники созданы и выпускаются промышленностью светодиоды для разных областей спектра — от инфракрасной вплоть до зеленой; основой для этих приборов служат полупроводники $A^{III}B^V$.

Однако современная оптоэлектроника начинает остро нуждаться в светодиодах и для остальных характерных областей оптического спектра, в частности синей [2.56 ÷ 2.72 эВ (485 ÷ 455 нм)] и фиолетовой [2.72 ÷ 3.1 эВ (455 ÷ 400 нм)]. Такая потребность возникает, в первую очередь, при создании полупроводниковых систем отображения информации с полной цветопередачей.

Для решения этой задачи наиболее перспективным материалом представляется карбид кремния, поскольку на его основе оказалось возможным создать *p-n*-структуры, дающие синюю и фиолетовую электролюминесценцию. Совершенствование таких *p-n*-структур позволило начать промышленное производство карбид-кремниевых светодиодов синего свечения [1, с. 5].

В краткой статье мы не имеем возможности дать подробный обзор работ, направленных на создание SiC-светодиодов синего и фиолетового свечения, и приведем лишь данные для наиболее эффективных приборов.

Светодиоды синего свечения [2, 3] изготовлены жидкостной эпитаксией SiC-6H в графитовых тиглях и имеют внешний квантовый выход $\eta \approx 10^{-4}$ при комнатной температуре. Светодиоды выпускаются фирмой «Siemens»; сила света светодиодов с полушириной диаграммы направленности излучения 16° составляет около 2.5 мкд при токе 20 мА и 293 К. В [4] сообщается об имплантированных светодиодах на основе политипа 4H с $\eta \approx 10^{-4}$.

Светодиоды сине-фиолетового свечения [5] были изготовлены на базе эпитаксиального *p-n*-перехода SiC-6H; сила света равна 150 мкд, рабочий ток 0.1 ÷ 1.0 А, напряжение ≤ 12 В.

Светодиоды сине-фиолетового свечения [6], изготовленные бесконтейнерной жидкостной эпитаксией SiC-6H, имели излучение, сосредоточенное в основном в фиолетовой области спектра.

Из опубликованных данных следует, что достаточно эффективные синие SiC-светодиоды создаются, как правило, на основе SiC-6H *p-n*-структур, причем структуры изготавливались жидкостной эпитаксией.

В данной работе изложена методика изготовления и представлены характеристики и параметры SiC-6H-светодиодов синего свечения, изготовленных методом бесконтейнерной жидкостной эпитаксии.

2. *Создание p-n-структур и конструкция светодиода.* Для изготовления SiC p-n-структур использовался метод бесконтейнерной жидкостной эпитаксии, в котором раствор-расплав Si-C находился во взвешенном состоянии в высокочастотном (200 кГц) электромагнитном поле, что исключало контакт раствора-расплава с технологической арматурой [7].

Светодиодные SiC-6H p-n-структуры выращивались на ориентированных монокристаллических подложках n-SiC-6H. Подложки, изготовленные по методу Лели, имели концентрацию нескомпенсированных доноров $N_d - N_a \approx$

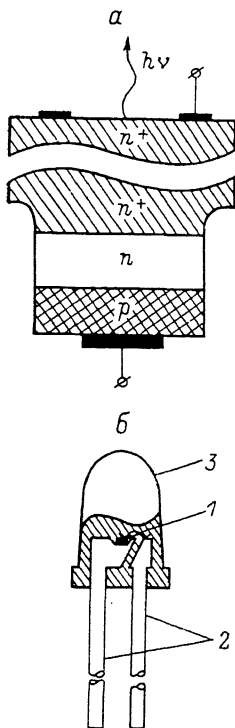


Рис. 1. Конструкция светодиода.

а) эпитаксиальная SiC-6H p-n-структура на n⁺-подложке; б) светодиод: 1 — светоизлучающая эпитаксиальная структура, 2 — электроды, 3 — полимерная линза.

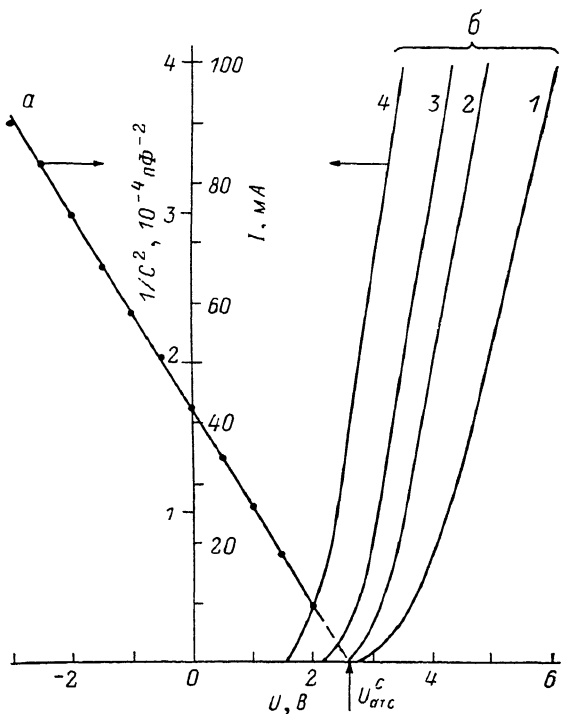


Рис. 2. Электрические характеристики p-n-структур.

а — характеристика дифференциальной емкости (С)—напряжение (U) при 293 К; б — характеристики прямой ток (I)—напряжение (U); Т, К: 1 — 213, 2 — 293, 3 — 373, 4 — 473

$\approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, площадь $5 \times 8 \text{ мм}$ и толщину 0.4 мм . Плоскость подложек перпендикулярна кристаллографической оси С.

Перед эпитаксией подложки химически травились (в расплаве КОН при 500°C) для удаления деформированного механической обработкой приповерхностного слоя; стравливался слой толщиной около 100 мкм .

Эпитаксия проводилась при температуре $1600 \div 1650^\circ \text{C}$ путем охлаждения раствора-расплава с погруженными в него SiC-подложками. p-n-Структуры выращивались в непрерывающемся процессе эпитаксии. Вначале на n⁺-подложку наращивался n-слой; этот слой специально не легировался и получался n-типа за счет имеющегося в растворе-расплаве остаточного азота (основной донор в SiC). Затем в раствор-расплав вводился в два этапа алюминий (основной акцептор в SiC): сперва в малой концентрации, так что наращивался компенсированный алюминием слой, а потом в большой концентрации, так что рос уже p-слой. При этом происходило наращивание на обе плоскости подложки. Для изготовления светодиодов использовались слои, выра-

щенные на Si-границы (слои на C-границы шлифовались). Общая толщина эпитаксиальных слоев на Si-границы около 30 мкм.

На изготовленной таким образом эпитаксиальной структуре методом реактивного ионно-плазменного травления формировались меза-структуры с площадью $p-n$ -перехода порядка 10^{-3} см^2 [8].

Для этого вначале на p -поверхность напылялись алюминиевые контакты размером $0.46 \times 0.46 \text{ мм}$, которые выполняли также роль маски при травлении меза-структур; травление производилось со стороны p -слоя.

После формирования меза-структур часть алюминиевого контакта удалялась, так что на p -стороне оставался контакт диаметром 0.2 мм. Затем на n -стороне создавался никель-хромовый контакт в виде сетки с размерами ячейки $0.17 \times 0.17 \text{ мм}$.

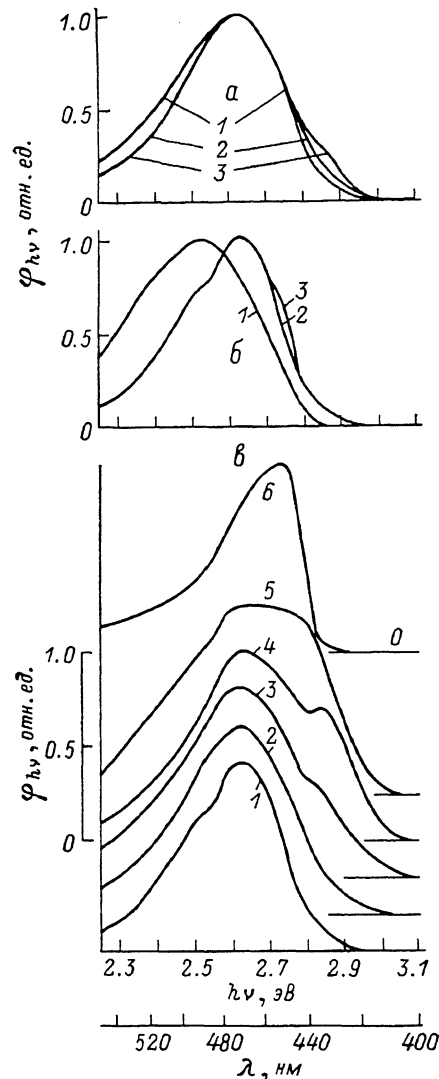


Рис. 3. Спектры электролюминесценции $p-n$ -структуры.

a — зависимость спектра от тока при $T=293 \text{ К}$; $I, \text{ мА}$: 1 — 0,5, 2 — 20, 3 — 100; *б* — то же при $T=213 \text{ К}$; *в* — зависимость спектра от температуры при токе 20 мА; $T, \text{ К}$: 1 — 213, 2 — 293, 3 — 363, 4 — 381, 5 — 423, 6 — 477. $\varphi_{h\nu}$ — спектральная плотность потока фотонов. Спектры приведены по равному максимуму.

После этого пластина, содержащая около 50 меза-структур с независимыми $p-n$ -переходами, разрезалась на дискретные элементы с площадью основания $0.5 \times 0.5 \text{ мм}$ и высотой около 0.4 мм (рис. 1, *a*).

Светоизлучающий элемент монтировался на держатель с отражателем света (рис. 1, *б*) p -стороной к основанию держателя. Свет выводился через n -подложку. Элемент герметизировался полимером (показатель преломления

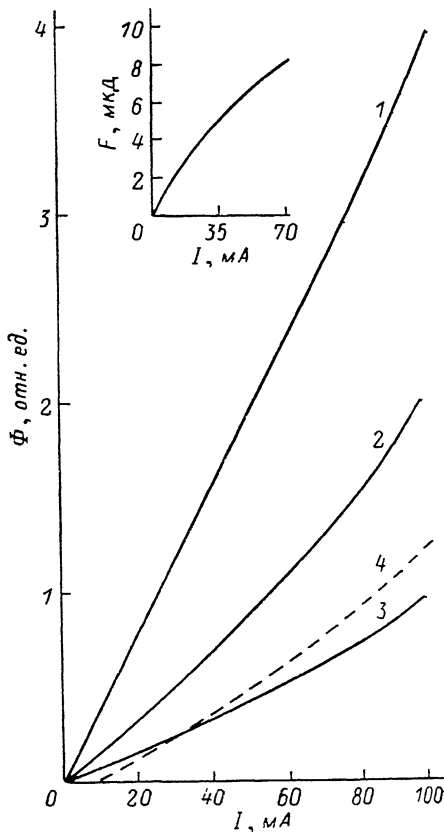


Рис. 4. Характеристики поток фотонов (Φ)—ток (I) $p-n$ -структуры при разных температурах.

$T, \text{ К}$: 1 — 213, 2 — 293, 3 — 400, 4 — 500. На вставке — характеристика сила света (F)—ток (I) светодиода с полушириной диаграммы направленности излучения 5° , измеренная на постоянном токе при 293 К.

1.55) с полусферическим куполом, сужающим диаграмму направленности излучения. Полимерное покрытие увеличивает η примерно в 1.6 раза.

3. *Характеристики и параметры светодиодов.* Измерение электрических и электролюминесцентных характеристик производилось как на светодиодах в корпусе с полимерной линзой (площадь $p-n$ -перехода $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$, площадь контакта к p -слою $3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$), так и на открытых (без полимера) $p-n$ -структурах (площадь $p-n$ -перехода и площадь контакта к p -слою $7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$).

Измерения проводились в интервале температур $213 \div 500 \text{ К}$ и токов $0.5 \div 150 \text{ мА}$. Для температурных измерений в интервале $213 \div 350 \text{ К}$ использовались как светодиоды с полимерной линзой, так и $p-n$ -структуры без полимера, а для более высоких температур — $p-n$ -структуры без полимера.

Статические характеристики при малых токах измерены на постоянном токе, а при больших — на импульсах, чтобы предотвратить разогрев структуры; длительность импульсов 10 мкс, скважность $10 \div 10^3$.

а) Характеристика дифференциальная емкость (C)—напряжение на $p-n$ -структуре (U) (рис. 2, а) линейна в координатах $1/C^2 - U$, что свидетельствует

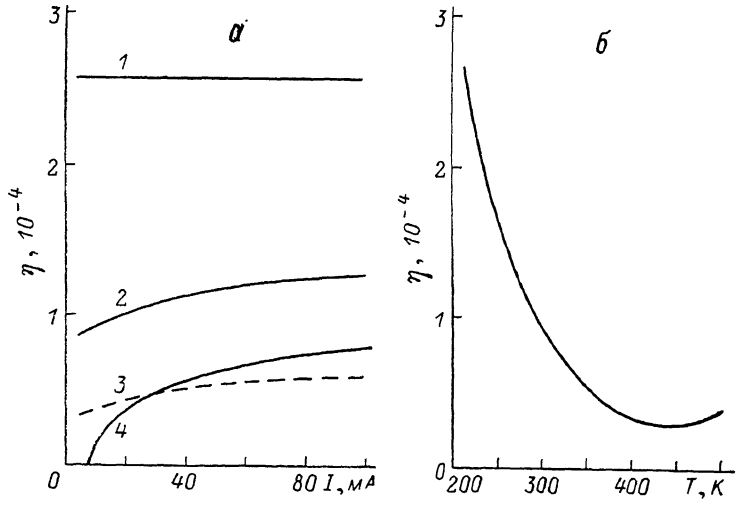


Рис. 5. Внешний квантовый выход электролюминесценции $p-n$ -структуры (η).

а — зависимость η от тока при разных температурах; $T, \text{ К}$: 1 — 213, 2 — 293, 3 — 400, 4 — 500; б — зависимость η от температуры при токе 20 мА.

о резком $p-n$ -переходе. Емкостное напряжение отсечки равно 2.6 В (293 К); ширина слоя объемного заряда при нулевом смещении около 0.1 мкм; приведенная концентрация доноров и акцепторов порядка 10^{17} см^{-3} .

б) Характеристика прямой ток (I)—напряжение (U) (рис. 2, б) при $U \geq E_g/q$ практически линейна [ширина запрещенной зоны $E_g \approx 3.1 \text{ эВ}$ (293 К), q — заряд электрона]. Остаточное дифференциальное сопротивление структуры равно $10 \div 20 \text{ Ом}$ ($\sim 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) при 293 К; падение напряжения при токе 20 мА (плотность тока 70 А/см^2) составляет 3.4 В (293 К).

Напряжение лавинного пробоя $p-n$ -структур около 100 В.

в) Спектры электролюминесценции широкие, их форма и положение максимума зависят от тока и температуры (рис. 3).

С ростом тока от 0.5 до 100 мА в интервале температур $293 \div 500 \text{ К}$ форма спектра практически не зависит от тока, энергия максимума спектра $h\nu_m$ слабо сдвигается в коротковолновую область, а полуширина спектра $\Delta h\nu$ незначительно уменьшается (рис. 3, а). При низких температурах (213 К) форма спектра уже зависит от тока, с ростом тока сдвиг спектра и его сужение выражены сильнее, чем при высоких температурах (рис. 3, б).

С ростом температуры спектр сдвигается в коротковолновую область и сужается (рис. 3, в), так что $h\nu_m = 2.62 \text{ эВ}$ (293 К) и 2.72 эВ (473 К), а $\Delta h\nu = 0.32 \text{ эВ}$ (293 К) и 0.23 эВ (473 К).

г) Характеристика поток фотонов (Φ)—прямой ток (I) (рис. 4) измерялась на импульсах (изотермический режим) и на постоянном токе (неизотермический режим).

На импульсах при низких температурах (от 213 до 293 К) Φ — I -характеристика близка к линейной; при более высоких температурах она приобретает сверхлинейный характер, причем отклонение от линейности тем сильнее, чем выше температура.

На постоянном токе при комнатной температуре Φ — I -характеристика сублинейна.

д) Внешний квантовый выход $\eta \equiv q\Phi/I$ зависит от тока (рис. 5, а) и температуры (рис. 5, б).

С ростом тока при низких температурах η практически не изменяется, а при высоких — несколько увеличивается, и это увеличение тем сильнее, чем выше температура.

С ростом температуры от 213 до 430 К η уменьшается (в 3 раза при возбуждении электролюминесценции импульсным током 20 мА), а при дальнейшем увеличении температуры η начинает слегка увеличиваться.

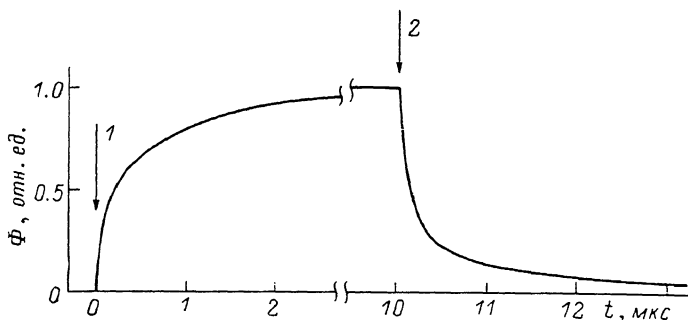


Рис. 6. Переходная характеристика светодиода при 293 К.

1 и 2 — моменты включения и выключения прямого тока.

е) Абсолютное значение внешнего квантового выхода светодиода порядка 10^{-4} (ток 20 мА, температура 293 К).

ж) Сила света измерена для светодиодов с разными диаграммами направленности излучения. При пропускании постоянного тока 20 мА и при температуре 293 К сила света равна 3.7 мкд (полуширина диаграммы направленности $\theta=5^\circ$), 2.3 мкд ($\theta=12^\circ$) и 1.5 мкд ($\theta=16^\circ$).

з) Переходная характеристика электролюминесценции (рис. 6) слабо зависит от тока в интервале 10–130 мА (293 К).

При включении импульса прямого тока длительностью 10 мкс интенсивность света нарастает до уровня 0.3 от стационарного за время, меньшее временного разрешения установки (≈ 30 нс). В дальнейшем интенсивность нарастает существенно медленнее: от уровня 0.3 до 0.9 за время ≈ 1.5 мкс.

При выключении тока интенсивность спадает до уровня 0.5 за время, меньшее 30 нс, и затем уменьшается до уровня 0.1 за время ≈ 1.5 мкс.

Сравнение синих SiC-6H-светодиодов, представленных в данной работе, с выпускаемыми фирмой «Siemens» [1] показывает, что их характеристики и параметры находятся на одинаковом уровне.

В заключение авторы благодарят А. А. Глаговского за предоставленные подложки SiC, И. В. Коркина и Т. А. Сидорову за помощь в проведении жидкостной эпитаксии.

Л и т е р а т у р а

- [1] Light Emitting Diodes. Short Form Catalog, 1986/1987. Ordering, N B3-B3303-x-x-7600. Siemens, München, 1986. 14 p.
 [2] Hoffman L., Zielger G., Theis D., Weyrich G. — J. Appl. Phys., 1982, v. 53, N 10, p. 6962–6967.
 [3] Ziegler G., Lanig P., Theis D., Weyrich G. — IEEE Trans., 1983, v. ED-30, N 4, p. 277–281.

- [4] Мохов Е. Н., Роевков А. Д., Рамм М. Г., Кольцова Е. Н., Мальцев А. А., Бараш А. С., Гуле Е. Г., Демаков К. Д., Ломакина Г. А., Семенов В. В., Федоренко А. П. — В кн.: Тез. докл. III Всес. совещ. «Физика и технология широкозонных полупроводников». Махачкала, 1986, с. 67.
- [5] Киселев В. С., Алтайский Ю. М., Авраменко С. Ф., Бойко С. И. — ПТЭ, 1984, № 1, с. 233.
- [6] Дмитриев В. А., Иванов П. А., Морозенко Я. В., Попов И. В., Челноков В. Е. — Письма ЖТФ, 1985, т. 11, в. 4, с. 246—248.
- [7] Дмитриев В. А., Иванов П. А., Коркин И. В., Морозенко Я. В., Попов И. В., Сидорова Т. А., Стрельчук А. М., Челноков В. Е. — Письма ЖТФ, 1985, т. 11, в. 4, с. 238—241.
- [8] Попов И. В., Сыркин А. Д., Челноков В. Е. — Письма ЖТФ, 1986, т. 12, в. 4, с. 240—243.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 25.09.1987
Принята к печати 8.10.1987

Баранский П. И., Буда И. С., Даховский И. В. Теория термоэлектрических и термомагнитных явлений в анизотропных полупроводниках. Киев: Наукова думка, 1987. 272 с.

В рамках последовательной микроскопической теории выполнен детальный анализ гальвано- и термомагнитных свойств анизотропных полупроводников с учетом анизотропии рассеяния носителей и многодолинного характера электронного спектра. Изложен ряд общих вопросов, относящихся к теории явлений переноса в анизотропных полупроводниках, в частности, при наличии взаимного электрон-фононного увлечения. Значительное внимание уделено процедуре решения кинетического уравнения: дано понятие о резольвенте, вычислены коэффициенты ее разложения и т. д. Освещены гальвано- и термомагнитные явления в однодолинных полупроводниках, в том числе четные и нечетные по магнитному полю эффекты, коммутационный эффект, свойства фононного термомагнитного тензора и др. Изучены гальвано- и термомагнитные явления в многодолинных полупроводниках кубической симметрии в слабых и классически сильных магнитных полях. Подробно исследуются гальванотермомагнитные явления в одноосно деформированных полупроводниках кубической симметрии в неквантующих магнитных полях в отсутствие и при наличии фононного увлечения: описаны тензоры сопротивления и электропроводности, тензоры пьезотермоэдс и магнитопьезотермоэдс, коммутационный эффект, фононный вклад в термомагнитный тензор. Специальная глава посвящена гальвано- и термомагнитным явлениям в полупроводниках с изоэнергетическими поверхностями в виде трехосных эллипсоидов.

Бонч-Бруевич В. Л., Звягин И. П., Карпенко И. В., Миронов А. Г. Сборник задач по физике полупроводников: учебн. пособие для вузов. М.: Наука, 1987. 144 с.

Данная книга, выходящая 2-м изданием (1-е вышло в 1968 г.) содержит задачи по основным вопросам физики полупроводников и предназначена для студентов и аспирантов университетов и вузов, специализирующихся в области физики полупроводников и полупроводникового материаловедения. По сравнению с 1-м изданием книга существенно переработана и дополнена с учетом расширения круга представлений и понятий, необходимых для специалистов в соответствующей области. Задачи рассчитаны на лиц, знакомых с общим курсом физики полупроводников, причем в начале каждой главы дана сводка основных необходимых формул. Тематика сборника: статистика электронов и дырок, рекомбинация носителей заряда, диффузия и дрейф носителей (в том числе в магнитном поле), поверхностные явления, термоэдс и фотоэдс, а также оптика полупроводников. В приложении приведены некоторые параметры полупроводниковых материалов и обсуждаются свойства интегралов Ферми. Все задачи снабжены подробными решениями.